



UNIVERSIDAD DE CUENCA
FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS
CARRERA DE INGENIERIA AMBIENTAL

**“EFECTO DEL CLORO EN LAS TUBERÍAS DOMICILIARIAS DE COBRE
EXPUESTAS AL AGUA POTABLE”**

**Trabajo de titulación previo a
la obtención del Título de
Ingeniero Ambiental**

AUTOR:

Gabriel Alejandro Bonifaz Barba

C.I. 0105730527

Tutor:

Ing. Fausto Fernando García Ávila Msc.

C.I. 0301454617

CUENCA – ECUADOR

2018

RESUMEN

Las redes de distribución de agua potable cuentan con tuberías de cobre comúnmente utilizadas en las ramificaciones de la red principal hasta los domicilios de los usuarios (conexiones domiciliarias). Las cuales al estar expuestas a las características agresivas del agua que transportan tienden a ocasionar un desgaste debido a los procesos corrosivos que se originan en el interior de las tuberías. El objetivo de este trabajo fue establecer una relación entre la variación de la tasa de corrosión que ocurre en el interior de las tuberías de cobre y la concentración de cloro residual presente en el agua potable de la red de distribución. Se instalaron cupones de corrosión de cobre en tres lugares con concentraciones diferentes de cloro residual. De esta manera se evaluó la pérdida de peso de cada cupón para establecer tasas de corrosión en distintos periodos de exposición. Mediante regresión lineal se observó que a medida que la concentración de cloro en el agua es mayor, la variación de la tasa de corrosión y la liberación de cobre disuelto de los cupones aumenta. Así se obtuvieron ecuaciones de la tasa de corrosión para distintos periodos de exposición, esto permitió evaluar el proceso corrosivo que se da en una red de distribución conociendo la concentración de cloro residual presente en el agua potable de distribución. Se determinó las zonas más propensas a fallas en los sistemas de tuberías de las conexiones domiciliarias, así como la vida útil de las mismas.

Palabras clave: Pérdida de peso, tasa de corrosión, capa de pasivación, liberación de cobre disuelto.



ABSTRACT

Drinking water distribution networks have copper pipes commonly used in the branches of the main network to the users homes (home connections). When it are exposed to the aggressive characteristics of the water they transport; the water tend to cause wear due to the corrosive processes that originate inside the pipes. The objective of this work was to establish a relationship between the variation of the corrosion rate that occurs inside the copper pipes with the concentration of residual chlorine present in the drinking water of the distribution network. Copper corrosion coupons were installed in three locations with different concentrations of residual chlorine. In this way, the weight loss of each coupon was evaluated to establish corrosion rates in different periods of exposure. By linear regression it was observed that as the concentration of chlorine in the water increases, the variation of the corrosion rate and the release of dissolved copper from the coupons increases. Thus, equations of the corrosion rate for different periods of exposure were obtained, this allowed to evaluate the corrosive process that occurs in a distribution network knowing the concentration of residual chlorine present in the drinking water distribution. Also, was determined the areas most prone to failures in the piping systems of the residential connections, as well as their useful life.

Key words: Weight loss, corrosion rate, passivation layer, release of dissolved copper.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	2
ABSTRACT	3
ÍNDICE GENERAL	4
ÍNDICE DE TABLAS.....	6
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	7
CLAUSULAS DE DERECHO DE AUTOR.....	8
CLAUSULAS DE PROPIEDAD INTELECTUAL.....	9
DEDICATORIA	10
AGRADECIMIENTOS.....	11
CAPITULO 1.....	12
1.1. INTRODUCCIÓN	12
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	14
1.3. JUSTIFICACIÓN	15
1.4. OBJETIVOS	16
1.4.1. Objetivo General	16
1.4.2. Objetivos Específicos.....	16
CAPITULO 2.....	17
2. MARCO TEORICO.....	17
2.1. CLORACION DEL AGUA	17
2.1.1. Características del cloro como desinfectante	17
2.2. DETERIORO DE LA CALIDAD DEL AGUA DENTRO DE LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN.	17
2.2.1. Decaimiento del cloro residual	18
2.2.2. Tiempo de estancamiento del agua potable.....	19
2.3. EL COBRE EN LA NATURALEZA Y EN EL AGUA POTABLE	20
2.4. USO DEL COBRE EN EL SISTEMA DE TUBERIAS DE DISTRIBUCION DEL AGUA POTABLE	20
2.5. CORROSIÓN	21
2.5.1. Formas de corrosión	23
2.6. CORROSION DE LAS TUBERIAS DE COBRE.....	25
2.6.2. Formación de la película de pasivación	28
2.6.3. Efecto del cloro residual.....	29
2.7. REGLA DEL PLOMO Y COBRE (LCR, LEAD AND COPPER RULE)	31
2.7.1. Problemas de salud relacionados con las concentraciones de cobre.....	31
2.8. TESTS DE CORROSION	31
2.8.1. Test de pérdida de peso	32

2.9. VIDA REMANENTE DE LAS TUBERÍAS DE COBRE.....	34
CAPITULO 3.....	35
3. METODOLOGIA.....	35
3.1. DISEÑO DEL TEST DE PERDIDA DE PESO	35
3.2. MATERIALES.....	35
3.2.1. Cupones de corrosión	35
3.2.2. Portacupón	36
3.2.3. Balanza analítica.....	37
3.3. PREPARACIÓN Y LIMPIEZA LOS CUPONES	37
3.4. TIEMPO DE EXPOSICIÓN.....	38
3.5. LUGAR DE EJECUCIÓN DE LA PRUEBA.....	39
3.5.1. INCORPORACIÓN DE CUPONES DE COBRE EN LA PLANTA DE POTABILIZACIÓN DE LA CIUDAD DE AZOGUES.	39
3.5.2. CUPONERA.	41
3.6. ANÁLISIS DE LA CONCENTRACIÓN DE CLORO.	42
3.7. TEST DE INMERSIÓN ESTÁTICA.....	43
3.8. ANALISIS ESTADISTICO	45
CAPITULO 4.....	47
4. RESULTADOS Y DISCUSION	47
4.1. Efecto del cloro en la pérdida de peso de los cupones.	47
4.2. Efecto del cloro en la tasa de corrosión de cobre por la pérdida de peso.	49
4.3. Variación de la pérdida de peso y tasa de corrosión con el tiempo de exposición.	53
4.4. Efecto del cloro en la corrosión por liberación de cobre.....	56
4.5. Efecto en las tuberías de cobre y en la calidad del agua potable.	60
4.6. Vida Remanente de las tuberías de cobre.....	62
CAPITULO 5.....	64
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	64
5.1. CONCLUSIONES.....	64
5.2. RECOMENDACIONES	65
BIBLIOGRAFIA.....	66
ANEXOS.....	71

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1 Rangos de Tasas de corrosión para tuberías de cobre. Fuente: (Baboian R, 2005)</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 2 Pérdida de peso de los cupones para cada tiempo de exposición. (Fuente: Autor, 2017)</i>	<i>47</i>
<i>Tabla 3 Análisis de varianza usado en el test F. (Fuente: Autor, 2017)</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 4 Tasa de Corrosión obtenida de la pérdida de peso. (Fuente: Autor, 2017).....</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 5 Análisis de varianza usado en el test F. (Fuente: Autor, 207)</i>	<i>52</i>
<i>Tabla 6 Diferencia de medias de la Tasa de Corrosión para distintas concentraciones de cloro. (Fuente: Autor, 2017)</i>	<i>55</i>
<i>Tabla 7 Diferencia de medias mediante el cálculo de valores t de student. (Fuente: Autor, 2017)</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 8 Datos del cloro residual en la Zona Alta de la red de distribución de Azogues. (Fuente: modificado Guanuchi C & Ordoñez J, 2017).....</i>	<i>60</i>
<i>Tabla 9 Vida remanente de las tuberías de cobre. (Fuente: Autor, 2017).....</i>	<i>62</i>

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 1 Conexión del Sistema de Distribución con el domicilio. Fuente: (Sandvig A, 2008)</i>	21
<i>Ilustración 2 Corrosión del cobre. Fuente: (Vargas I, 2010) ¡Error! Marcador no definido.</i>	
<i>Ilustración 3 Representación esquemática de la formación de la capa de pasivación. Fuente: (Gallegos A, 2005)</i>	28
<i>Ilustración 4 Cupón de cobre. (Fuente: Autor, 2017).....</i>	36
<i>Ilustración 5 Portacupón. (Fuente: Autor, 2017).....</i>	36
<i>Ilustración 6 Balanza Analítica. (Fuente: Autor, 2017).....</i>	37
<i>Ilustración 7 a) Ácido clorhídrico b) Agua destilada. (Fuente: Autor, 2017)</i>	38
<i>Ilustración 8 Limpieza y preparación de los cupones. (Fuente: Autor, 2017).....</i>	38
<i>Ilustración 9 a) Zona de filtración; b) Canales de distribución; c) Cupón. (Fuente: Autor, 2017).....</i>	40
<i>Ilustración 10 a) Tanques de cloración; b) Parte superior del tanque; c) Cupón. (Fuente: Autor, 2017)</i>	40
<i>Ilustración 11 Cuponera. (Fuente: Autor, 2017).....</i>	41
<i>Ilustración 12 Válvula de flujo y Medidor de Presión. (Fuente: Autor, 2017).....</i>	42
<i>Ilustración 13 Orientación de los cupones. (Fuente: Autor, 2017).....</i>	42
<i>Ilustración 14 Test de inmersión estática. (Fuente: Autor, 2017)</i>	44
<i>Ilustración 15 Medición de cobre en el colorímetro. (Fuente: Autor, 2017)</i>	45
<i>Ilustración 16 Relación de la pérdida de peso con la concentración de cloro. (Fuente: Autor, 2017)</i>	49
<i>Ilustración 17 Relación de la Tasa de Corrosión con la concentración de cloro. (Fuente: Autor, 2017).</i>	51
<i>Ilustración 18 Variación del peso con el tiempo de exposición. (Fuente: Autor, 2017)</i>	54
<i>Ilustración 19 Relación de la Tasa de Corrosión con el tiempo de exposición. (Fuentes: Autor, 2017)</i>	55
<i>Ilustración 20 Medición de cobre en distintas concentraciones de cloro. (Fuente: Autor, 2017).....</i>	57
<i>Ilustración 21 Liberación de cobre en el agua. (Fuente: Autor, 2017).....</i>	58
<i>Ilustración 22 Relación del cobre disuelto con la concentración de cloro. (Fuente: Autor, 2017)</i>	59
<i>Ilustración 23 a) Concentraciones de cloro (mg/l) simulación EPANET. (Fuente: Guanuchi C & Ordoñez J, 2017) b) Tasa de Corrosión para cada punto de muestreo a partir de la concentración de cloro. (Fuente: modificado (Guanuchi C & Ordoñez J, 2017))</i>	61

CLAUSULAS DE DERECHO DE AUTOR



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Cláusula de derecho de autor.

Gabriel Alejandro Bonifaz Barba en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "EFECTO DEL CLORO EN LAS TUBERÍAS DOMICILIARIAS DE COBRE EXPUESTAS AL AGUA POTABLE", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 4 de enero de 2018.



Gabriel Alejandro Bonifaz Barba.

C.I: 0105730527

CLAUSULAS DE PROPIEDAD INTELECTUAL



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Cláusula de Propiedad Intelectual

Gabriel Alejandro Bonifaz Barba, autor del trabajo de titulación "EFECTO DEL CLORO EN LAS TUBERÍAS DOMICILIARIAS DE COBRE EXPUESTAS AL AGUA POTABLE", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 4 de enero de 2018.



Gabriel Alejandro Bonifaz Barba.

C.I: 0105730527

DEDICATORIA

Este trabajo de titulación va dedicado a mi familia por ser un apoyo en cada paso que he dado a lo largo de mi corta vida. A mis padres Ángel y Sonia que han sido una guía y principalmente un modelo de superación. A mis hermanos Diego y Dennys que a pesar de las dificultades me han demostrado que el esfuerzo puede superar todas las adversidades. A mi novia Lisseth que ha sido un apoyo incondicional. Finalmente, a mis amigos ya que muchas veces tenían distintos puntos de vista en diversas situaciones para solucionar problemas.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a la empresa EMAPAL EP, por la apertura para la realización de este trabajo, a Don Nico por la ayuda brindada en la instalación e inspección de los cupones en los lugares de implementación.

Al Director de este trabajo el Ing. Fernando García, por su cordialidad, apoyo y por transmitir sus conocimientos y su motivación por la ciencia a lo largo de la ejecución de este trabajo.

Al Ing. Jaime Cuenca por su disponibilidad para el uso del laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Cuenca, al Ing. Aleksandr Khachatryan por su asesoría en algunas ocasiones para el desarrollo de este trabajo. A Christian Quezada por su ayuda para la inspección visual de los cupones.

CAPITULO 1

1.1. INTRODUCCIÓN

Los entes encargados de suministrar agua potable a los usuarios de las diferentes ciudades realizan distintos tratamientos de purificación y desinfección del agua recolectada, entre los más comunes y utilizados se encuentran la coagulación, floculación, filtración y desinfección. La desinfección es uno de los pasos importantes, puesto que consiste en la incorporación de cloro para desinfectar y eliminar los contaminantes microbiológicos del agua luego de la filtración. De esta manera se pretende prevenir posibles afecciones en la salud de los diferentes usuarios que aprovechan los beneficios de los sistemas de potabilización de agua para las distintas actividades diarias; para que esto se lleve a cabo la red de distribución del agua potable cuenta con tuberías que transportan el agua abasteciendo a la ciudad.

Generalmente las redes de distribución cuentan con una gran cantidad de tuberías de cobre las cuales son utilizadas en las ramificaciones de la red principal hasta los domicilios de los usuarios (conexiones domiciliarias). Las cuales al estar expuestas a las características agresivas del agua que transportan tienden a ocasionar un desgaste debido a los procesos corrosivos que se originan en el interior de las tuberías. Este es uno de los mayores problemas que los servicios de potabilización y distribución del agua potable presentan, puesto que al generarse procesos corrosivos en las tuberías estas tienden a sufrir un desgaste en las paredes y en muchas ocasiones se originan perforaciones y por consiguiente fugas de agua potable. Lo que genera pérdidas económicas que pueden ser estimadas en millones de dólares en la infraestructura pública incluyendo la perdida de hasta un 15% de agua en fugas (Dietrich A., 2004).

Pero estos son solo los problemas que se pueden observar, mientras que exista un proceso corrosivo en el interior de las tuberías existe un desprendimiento de cobre en el agua. La concentración de cobre en el agua no debe sobrepasar el límite establecido por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos, mediante la Regla de Plomo y Cobre (LCR), de 1300 ug/L de cobre, al exceder este límite los usuarios que utilizan el agua contaminada pueden presentar distintos problemas de salud relacionados con la concentración de cobre ingerida. Los problemas más comunes causados por la ingesta de cobre son gastrointestinales como vomito, náuseas, dolor de estómago. Personas con desordenes genéticos tienden a acumular cobre en el hígado y en los riñones (Pontius F, 1998; Schroeder H, 1966; United States Department of Health and Human Services., 2004).

De igual manera la corrosión de las tuberías de cobre puede generar cambios en la calidad del agua potable que llega a los domicilios. Es posible que las características fisicoquímicas del agua provoquen estos procesos corrosivos. American Water Works Association, 1996 ha realizado investigaciones con el objetivo de mejorar el conocimiento acerca de las causas químicas de la corrosión mediante la consideración de los parámetros químicos del agua potable como el pH, sulfatos, cloruros y otros iones orgánicos e inorgánicos; dureza y otros cationes orgánicos e inorgánicos; tipos de oxidantes a distintas concentraciones; oxígeno disuelto y otros gases disueltos; tipo de materia orgánica a distintas concentraciones; alcalinidad. Edwards M, 1996 determinó que existe una mayor disolución de cobre en agua bajo condiciones de estancamiento con bajo pH y alta alcalinidad.

El nivel de cloro debe mantenerse constante a través del sistema de distribución de agua potable, debido a que desempeña el papel de desinfectante y controla la actividad microbiana a lo largo de las tuberías. Es importante determinar si existe una relación entre el cloro residual y la corrosión interna de los sistemas. Atlas D, 1982; Boulay N., Edwards M., 2001; Cantor A, 2003; Weizhong X, 2001 en sus estudios establecieron que el cloro actúa como oxidante y puede contribuir a una mayor disolución del cobre en agua de los sistemas comunes de tuberías. Aunque en el estudio de (Boulay N., Edwards M., 2001) se obtuvieron resultados contradictorios ya que observaron el cloro puede aumentar y disminuir la corrosión interna de las tuberías expuestas a agua con distintos valores de pH.

Mientras que (Rodolfo A, 1987) observó que a concentraciones de cloro residual 1 a 1,5 mg/l se presenta un incremento en la corrosión del cobre. Este estudio demostró que aguas cloradas con presencia de oxígeno produce que el ataque corrosivo tienda a ser más severo. Es muy probable que en las condiciones de los sistemas de distribución de agua potable se pueda observar los mismos efectos ya que existe un alto potencial de oxidación por la presencia de ácido hipocloroso y el ion hipoclorito.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las plantas potabilizadoras, el sistema de distribución de agua potable y las conexiones de los domicilios de la mayoría de las ciudades cuentan con tuberías, soldaduras y accesorios de plomería hecha de cobre u otros metales. Las tuberías de cobre utilizadas para conectar la red de distribución con los domicilios de los usuarios comúnmente presentan problemas de corrosión; una posible causa puede estar relacionada a las características fisicoquímicas del agua. Atlas D, 1982; Boulay N., Edwards M., 2001; Cantor A, 2003; Rodolfo A, 1987 indican que los altos niveles de cloro residual es uno de los causantes de la corrosión de las tuberías. La corrosión interna de los sistemas de distribución de agua potable genera varios problemas en las características del agua provocados por los productos de corrosión de las tuberías que distribuyen la misma (Slavickova K, 2013).

En la línea de distribución de agua potable es fundamental el abastecimiento de agua segura a los consumidores. El agua corrosiva a veces puede disolver suficiente de estos metales para crear problemas tanto estéticos en el agua potable y de salud en los consumidores. Al disolver altas concentraciones de cobre de las tuberías y accesorios, el cobre puede causar manchas de color verde azulado en lavabos y un sabor metálico al agua, sobre todo con el agua en contacto con los tubos durante varias horas (generalmente en la noche). El agua corrosiva también puede disolver el plomo de las soldaduras que unen las tuberías de cobre. En ciertos casos, la corrosión puede ser lo suficientemente grave como para causar fugas en las tuberías (Sancha A, 2012). De la misma manera la corrosión influye en distintos parámetros de la calidad del agua de distribución como son: color, turbidez, conductividad y la concentración de metales incrementa mientras el contenido de oxígeno disuelto disminuye (Slavickova K, 2013).

Los problemas asociados al proceso de corrosión pueden incrementarse si no son detectados a tiempo, por lo que este estudio pretende evaluar la influencia de la concentración de cloro presente en el agua de distribución con la tasa de corrosión de las tuberías de cobre que son utilizadas en las conexiones domiciliarias.

1.3. JUSTIFICACIÓN

La finalidad del presente trabajo de investigación fue determinar la existencia del posible efecto producido por la concentración del cloro utilizado en los procesos de desinfección de las plantas potabilizadoras y la concentración de cloro residual existente a lo largo de la red de distribución de agua potable con los procesos corrosivos en las tuberías de cobre usadas en las conexiones domiciliarias que van desde la red principal hasta las viviendas, así como las tuberías que actualmente son instaladas en los interiores de los hogares de los usuarios.

Para determinar este posible efecto del cloro residual en las tuberías de cobre se realizó una serie de experimentos que replicaron las condiciones a las que se exponen las tuberías de cobre en contacto con agua potable en la red de distribución, en los que se determinó la variación de peso de cupones de cobre expuestos a distintas concentraciones de cloro y a diferentes tiempos. De esta manera se obtuvo una tasa de corrosión anual (mpy) en el sistema y se pudo determinar la vida remanente de las tuberías. Con los resultados obtenidos se calculó un posible tiempo determinado para el reemplazo de las tuberías defectuosas. Además, se determinó la liberación de cobre disuelto en el agua de los cupones en distintas concentraciones de cloro y de esta manera establecer si los procesos corrosivos en las tuberías de cobre afectan la calidad del agua potable.

Estos resultados servirán de soporte para prevenir fallas por corrosión e importantes pérdidas económicas tanto para las empresas potabilizadoras, así como para los dueños de las viviendas, en cuanto al manejo del agua potable, garantizando la continuidad operativa de las instalaciones de cobre.



1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo General

Evaluar el efecto del cloro residual en las tuberías de cobre utilizadas en las conexiones domiciliarias para el transporte de agua potable.

1.4.2. Objetivos Específicos

Determinar la tasa de corrosión en tuberías de cobre por la presencia de cloro residual en el agua potable.

Encontrar una correlación entre la presencia de cloro residual y el desgaste de cobre en las tuberías.

Evaluar los efectos producidos por la corrosión en las tuberías de cobre y en la calidad del agua potable.

CAPITULO 2

2. MARCO TEORICO

2.1. CLORACION DEL AGUA

En los suministros de agua, la desinfección se puede definir como el proceso del uso de medios químicos o físicos para inactivar los microorganismos dañinos que pueden estar presentes en el agua filtrada o en el interior de la red de distribución con el fin de proteger el agua distribuida del nuevo crecimiento de patógenos (Howe, Hand, Crittenden, Trussell, & Tchobanoglous, 2013).

El cloro es usado para la desinfección como parte de los últimos tratamientos en el proceso de potabilización, desempeña un rol importante en la protección de los sistemas de abastecimiento de agua potable contra enfermedades infecciosas transmitidas por el agua. El (INEN 1108, 2010) señala entre algunos de los requisitos, para que el agua potable sea apta para el consumo humano, los niveles de cloro libre debe estar entre 0.3 y 1.5 mg/l.

2.1.1. Características del cloro como desinfectante

El cloro es utilizado ampliamente como desinfectante en el agua por las siguientes cualidades (Legay, Rodriguez, Sérodes, & Levallois, 2010; Schijven et al., 2016):

- a) Destruye los organismos patógenos del agua en condiciones ambientales y en un tiempo corto.
- b) Es de fácil aplicación, manejo sencillo y bajo costo.
- c) Para la determinación de su concentración en el agua es sencilla y de bajo costo.
- d) En las dosis utilizadas en la desinfección de las aguas, no constituye riesgo para el hombre ni para los animales.
- e) Deja un efecto residual que protege el agua de una posterior contaminación en la red de distribución.

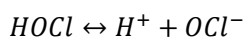
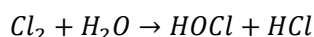
2.2. DETERIORO DE LA CALIDAD DEL AGUA DENTRO DE LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN.

Los sistemas de distribución de agua potable son complejas redes de tuberías y tanques que distribuyen el agua tratada hacia los usuarios del servicio. La variación en las propiedades fisicoquímicas del agua conlleva a problemas químicos, físicos y biológicos en las paredes de una tubería, lo que ocasiona un deterioro en la calidad del agua de los sistemas de distribución, generalmente en los domicilios.

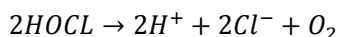
Algunas reacciones químicas producen varios problemas, entre los de mayor importancia se encuentran: reducción de desinfección por la disminución del cloro residual, formación de subproductos de desinfección, desarrollo de sabor y olor, aumento de pH, corrosión de las tuberías. De hecho, la pérdida de desinfectante residual, la corrosión y la formación de subproductos de desinfección son los problemas químicos más comunes.

2.2.1. Decaimiento del cloro residual

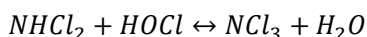
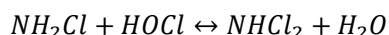
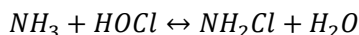
Cuando el cloro es añadido al agua, se originan una serie de reacciones. El cloro se hidroliza rápidamente y producen ácido hipocloroso (HOCl) y ácido clorhídrico (HCl). El ácido hipocloroso es un ácido débil que se ioniza al pH de 7.5 y a 25°C, formando ion hipoclorito (OCl). Ambos son buenos agentes desinfectantes, pero el HOCl es más efectivo (Fang L, 2008).



Nguyen, 2005; Rodolfo A, 1987 mencionan que el cloro libre, ácido hipocloroso y el ion hipoclorito, están termodinámicamente destinados a formar Cl^- y puesto que es inestable en el agua, el Cl_2 puede reaccionar lentamente con el H_2O para formar oxígeno a través de una reacción de auto-descomposición:



En sistemas de agua, la formación de las cloraminas se origina cuando el cloro reacciona con el amoníaco. La presencia de compuestos orgánicos nitrogenados en agua cruda y tratada pueden generar problemas cuando las cloraminas son formadas, estas a su vez tienen cierto poder desinfectante (Ward N, 1984). Aunque no es tan efectivo contra virus, este beneficio detiene la formación de desinfección por subproductos. El ácido hipocloroso reacciona rápidamente con el amoníaco para formar monoclорamina (NH_2Cl), dicloramina ($NHCl_2$) o tricloruro de nitrógeno (NCl_3) (Fang L, 2008):



De igual manera, la cloramina se presenta inestable en el agua y tiende a decaer a la forma Cl^- . La ecuación que representa esta reacción de auto descomposición es la siguiente:



Nguyen, 2005 señala que el decaimiento de cloro y cloramina está en función de la temperatura a través del tiempo. Por ejemplo, en un periodo de 120 horas el 71% del cloro residual se perdió a 20°C y un 90% a 30°C. El estudio demostró que la tasa de pérdida de la cloramina era menor que la del cloro residual. Al reaccionar la cloramina en el agua se produce el decaimiento a Cl^- , lo que genera la formación de amoníaco en las tuberías de cobre.

Edwards M, 2010 determinó que existe un mayor decaimiento del cloro residual en contacto con el cobre en comparación con otros tipos de tuberías, debido a que el cobre tiende a oxidarse. La cantidad de cloro es reducida conforme reacciona con el cobre.

2.2.2. Tiempo de estancamiento del agua potable.

El tiempo de estancamiento del agua potable hace referencia a su tiempo de residencia, desde el momento que sale de la planta de potabilización a la red de distribución hasta la llave de agua domiciliar. Se define como la suma del tiempo que el agua pasa en el sistema de distribución más el tiempo que permanece en el sistema de tuberías domiciliar, en el cual se producen reacciones químicas y biológicas relacionadas con la corrosión interna de las tuberías (Rhoads W, 2015).

Los sistemas potabilización y distribución de agua potable presentan elaborados sistemas de tuberías y tanques, en los cuales las características fisicoquímicas del agua tienden a deteriorar estos sistemas mediante reacciones químicas en la superficie de las tuberías, las cuales a lo largo del tiempo tienden a deteriorar al sistema (U.S. Environmental Protection Agency, 2002).

La influencia del tiempo de estancamiento con la corrosión interna está condicionada por las características de la calidad del agua y el tipo de tubería. Varios estudios presentan una relación del tiempo de estancamiento considerando la presencia del cloro residual en el agua de distribución con la corrosión interna del sistema de tuberías (Edwards M, 2004). Aunque el cloro residual actúa como desinfectante en el agua del sistema de distribución, este produce un efecto oxidante en las paredes internas de las tuberías generando la disolución de cobre en el agua.

2.3. EL COBRE EN LA NATURALEZA Y EN EL AGUA POTABLE

El cobre es un metal suave, maleable, dúctil y altamente conductor normalmente de color rojo claro (American Water Works Association, 1996). En la tabla periódica es el primer metal noble del grupo 1B, el cual es encontrado en la naturaleza en su estado puro. El cobre en su etapa de oxidación es altamente activo, debido a que forma más sales solubles en agua que ningún otro material de su grupo periódico u otros compuestos (Seiler H, 1994). Presenta cuatro estados naturales de oxidación: Cu (0), Cu(+1), Cu(+2) y Cu(+3). El ion cuproso o Cu(+1) es inestable y se oxida rápidamente a Cu(+2) o se reduce a Cu(0) en agua. Este puede ser un componente estable de un compuesto insoluble como el CuCl(s) o Cu₂O(s). El ion cúprico o Cu(+2), es la más importante forma de oxidación del cobre, debido a que genera una variedad de compuestos, la mayoría solubles en el agua, por la unión de iones solubles orgánicos e inorgánicos comúnmente de color azul o verde (Seiler H, 1994; United States Department of Health and Human Services., 2004).

El cobre comúnmente se encuentra en la naturaleza en concentraciones bajas, esto explica su presencia en el agua potable generalmente medidas en ug/l de concentración. USEPA, 1991 muestra concentraciones promedios de 0.075 y 0.066 mg/l en aguas superficiales en Norteamérica; mientras que (World Health Organization, 2003) muestra concentraciones de 0.0008 a 0.010 mg/l Cu para ríos sin contaminación en Asia; un promedio 0.006 y un rango entre 0.003–0.019 mg/l Cu para ríos del Reino Unido.

Cuando se presentan concentraciones elevadas de cobre disuelto en el agua esta tiende a adquirir una coloración azul, provocada por la presencia de concentraciones de cobre entre 500-1000 mg/l, aunque es más común encontrar concentraciones de cobre entre 3-10 mg/l según (Edwards M, 2000).

2.4. USO DEL COBRE EN EL SISTEMA DE TUBERIAS DE DISTRIBUCION DEL AGUA POTABLE

En los sistemas de distribución de agua potable generalmente se utiliza el cobre como material de las tuberías en las acometidas de los domicilios, por ser un metal noble resistente a la corrosión (Lane R, 1993). Las tuberías de cobre son fácil de instalar, (Shim J, 2004) menciona que se ha demostrado que puede matar cierto número de bacterias presentes en el agua. Los metales comúnmente utilizados para tuberías han sido reemplazados por las de cobre de aproximadamente dos pulgadas de diámetro por su costo competitivo (Copper Development Association, 2005).

En la distribución del agua potable los materiales de cobre son comúnmente usados en la conexión de la red de distribución con los domicilios, comúnmente llamadas

“acometidas”, y en algunos casos en el sistema interno de tuberías del domicilio. Tal como se muestra en la Ilustración 1.



Ilustración 1 Conexión del Sistema de Distribución con el domicilio. Fuente: (Sandvig A, 2008)

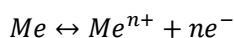
2.5. CORROSIÓN

La corrosión es la degradación de la masa de un material expuesto a condiciones ambientales a través del tiempo, mediante reacciones químicas o electroquímicas que se producen entre un metal o aleación con el medio que lo rodea. Se presenta como la tendencia que tienen los metales a regresar al estado en el que se encontraban en la naturaleza, estado combinado o al estado estable. Generalmente los compuestos metálicos forman óxidos o sulfuros, u otros compuestos metálicos básicos comúnmente considerados como minerales (Schweitzer P, 2007). La cantidad de corrosión se encuentra condicionada por el agua o por el oxígeno debido que son factores esenciales para que se produzcan los procesos corrosivos. Este proceso electroquímico cumple las leyes básicas de la termodinámica. Por lo tanto, bajo condiciones controladas este puede ser medido, repetido y predicho.

La corrosión en entornos acuáticos es la más común de las formas de corrosión, puesto que generalmente en el agua se encuentran sales disueltas o gases en su interior, estas disociaciones modifican las características fisicoquímicas del agua produciendo reacciones químicas.

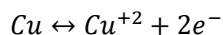
Nadja F, 2006 indica que en el proceso de corrosión de los metales se producen reacciones electroquímicas donde los electrones son transferidas entre los elementos que intervienen en el proceso corrosivo. Las reacciones que se producen en un medio

electrolítico como el agua ocasionan la transferencia del ion que es oxidado y del ion receptor que es reducido estas reacciones ocurren en la superficie del metal hasta que la reacción este en equilibrio como muestra la siguiente ecuación:

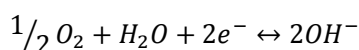


Los electrones dejan la parte anódica de la superficie del metal y pasan a través del medio electrolítico hacia la parte catódica. La corrosión se da en la parte anódica por la pérdida del metal, debido que el ánodo presenta las condiciones óptimas para la oxidación, esta liberación de electrones de las moléculas del metal causa una corriente eléctrica desde el ánodo hacia el cátodo, la magnitud de medida se determina como el proceso de corrosión. Proceso que ocurre en la corrosión general o uniforme cuando las áreas anódicas se mueven uniformemente sobre la superficie del metal, estas reacciones ocurren uniformemente sobre toda la superficie expuesta o sobre un área extensa (Bastidas D, 2010; Schweitzer P, 2007).

Ives D, 1962 señala que la oxidación del cobre metálico es un proceso que consiste en dos reacciones. La reacción anódica produce el desprendimiento de iones metálicos de la superficie del metal en el agua, dejando electrones libres para consumir oxígeno e iones de hidrogeno (H+) mediante la reacción catódica. La formación de la capa de óxido depende del pH, oxígeno disuelto y la temperatura. La disolución y transporte del cobre disuelto conecta los procesos anteriores en la interface metal-liquido con la composición del agua cuando se presentan altas concentraciones de cobre en el agua potable. Las reacciones de oxidación del cobre se dan de la siguiente manera:

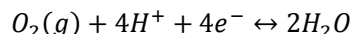


Se debe tener en cuenta que, aunque el proceso de disolución del metal se lleva a cabo a través de la reacción anódica, la reacción catódica es igual de importante en el proceso general. En cada reacción de oxidación existe de manera simultánea una reacción de reducción, puesto que los electrones no pueden estar libres en una solución aun en pequeñas concentraciones. Generalmente se da cuando existe un contacto entre agentes oxidantes y reductores, el oxígeno disuelto es al agente oxidante más común presente en el agua, mostrado en la siguiente ecuación (Schweitzer P, 2007):



Lane R, 1993; Schock M, 1995 determinaron que el cobre en contacto con agua pura no tiende a corroerse. Si en el agua se encuentran agentes oxidantes como el oxígeno

disuelto, cloro disuelto y especies de cloraminas, se produce la corrosión del cobre puesto que son receptores dominantes de electrones en el agua potable (Palit A, 2000; Schock M, 1995). La reacción primaria en el agua potable con un rango de pH entre 6,5 y 9,5 se da con el oxígeno, demostrado en la siguiente ecuación:



La corrosión se desarrolla hasta que el oxígeno disuelto es consumido o hasta que se forme la capa de pasivación (Palit A, 2000). Esta capa protectora reduce la corrosión hasta que el oxígeno y el cloro se agoten como agentes oxidantes. Feng Y, 1996 demostró que la difusión de los iones de cobre en la película de pasivación controla la tasa de corrosión global futura.

2.5.1. Formas de corrosión

La mayoría de las formas de corrosión ocurren mediante mecanismos electroquímicos (Winston R & Herbert H, 2008). Schweitzer P, 2007 señala que las formas básicas de corrosión de los materiales metálicos son las siguientes:

- Corrosión uniforme
- Corrosión intergranular
- Corrosión galvánica
- Corrosión por picaduras o localizada
- Corrosión por erosión
- Corrosión biológica

Schweitzer P, 2007 señala que cada forma de corrosión se da por la presencia de distintos factores que influyen en el medio ambiente al que se encuentra expuesto un metal, de igual manera cada metal se ve afectado de diversas formas a las condiciones que presenta su entorno.

La corrosión intergranular es un ataque especial que se da en los límites de las granulaciones de la superficie del metal, debido a que los límites intergranulares actúan como el ánodo y la mayor parte de la granulación conforma el cátodo, generando un ataque rápido que penetra profundamente la superficie del metal.

La corrosión galvánica es usualmente referida a la corrosión por diferentes metales. Por ejemplo, cuando se conecta tuberías de cobre con tuberías de acero de carbono comúnmente encontradas en viviendas antiguas.

La corrosión por picadura es en sí un mecanismo de corrosión, pero también es asociada con otros tipos de corrosión. Se caracteriza por una alta pérdida localizada del

metal, en casos extremos se genera por pequeños agujeros en la superficie del metal que aumentan su profundidad a medida que el proceso se lleva a cabo.

La corrosión por erosión se aplica al deterioro por fuerzas mecánicas que desgastan la superficie del metal y aceleran la tasa de corrosión. Este ataque genera grietas o depresiones siguiendo una dirección, ya sea por la velocidad del fluido, turbulencia, temperatura o la presencia de sólidos suspendidos. Estas perforaciones tienden a provocar rupturas ya que las paredes disminuyen su espesor y el metal no puede soportar la presión del fluido que transporta.

La corrosión biológica se refiere a la degradación de los metales causada por macro o microorganismos. No se representa como una forma especial de corrosión, pero agrava la corrosión en condiciones ambientales en las cuales se espera una baja tasa de corrosión; debido a que los microorganismos influyen en las reacciones anódicas y catódicas.

A continuación, se indicará sobre la corrosión uniforme, que es el tipo de corrosión que se da en la parte experimental de este proyecto de investigación. En los sistemas de agua potable es común el desarrollo del proceso de corrosión uniforme a lo largo de las paredes de las tuberías; aunque algunos factores como la velocidad del flujo, las características químicas del agua, la superficie del metal y factores microbiológicos pueden generar procesos de corrosión por picadura, erosión o biológica (Baboian R, 2005).

2.5.1.1. Corrosión uniforme

La forma más común de corrosión que se presenta en los materiales metálicos es la corrosión uniforme. Generalmente se presenta como una tasa uniforme de pérdida de la superficie del metal expuesto a ataques químicos o mediante la disolución de los componentes metálicos en iones metálicos (Bastidas D, 2010; Schweitzer P, 2007). La corrosión uniforme ocurre cuando el metal se ve afectado de la misma manera a lo largo de toda su superficie. Es decir que para un periodo de exposición la corrosión se distribuye de la misma manera sobre la superficie. EPA, 2016 presenta como un problema importante en la distribución de agua puesto que a lo largo de las paredes de las tuberías ocurren reacciones internas que provocan la pérdida uniforme del metal en toda su superficie.

Baboian R, 2005 establece que hay dos aspectos de la corrosión que deben ser considerados: uno es la tendencia a la reacción de corrosión y el segundo es la tasa en

la cual la reacción ocurre. A menudo uno de estos principios es considerado sin tomar en cuenta al otro, lo que genera conclusiones erróneas.

La corrosión uniforme en una superficie metálica es la tendencia a la reacción de corrosión producto de la magnitud de la fuerza electromotriz de las celdas de corrosión presentes en el proceso de corrosión (Uhlig H & Revie R, 1985) . Estas celdas de corrosión en algunos materiales se generan por la naturaleza heterogénea de la superficie, conocida como celda local. El concepto de celda local se asimila al de una batería, ya que la oxidación ocurre en el ánodo y la reducción en el cátodo. Pero distinto a una batería, ya que está compuesta por distintos materiales inmersos en un electrolito común, la celda local en caso contrario en la superficie uniforme de un material puede existir impurezas, fases de aleación o distribuciones de presión no uniformes (Baboian R, 2005). Estas áreas activas de corrosión son distribuidas de forma similar sobre toda la superficie.

Las reacciones de corrosión son complejas, debido a que consiste de varias etapas. Cada etapa de la secuencia de reacción genera una resistencia a la reacción de corrosión, por lo que la tasa de corrosión total no puede ser más rápida que la etapa de la reacción.

Fontana & Greene, 1987 señala que las etapas que controlan la tasa de corrosión se denominan comúnmente como: control de la concentración y control de la activación. El control de la concentración determina la etapa en el que los reactantes o los productos se mueven hacia la superficie de corrosión, o conocida como transferencia de masa o control de difusión. El control de activación se refiere a la tasa de oxidación y reducción que ocurre en la superficie metálica, o conocida como control de transferencia de carga, esta puede variar según las propiedades del metal en distintos ambientes.

La formación de las capas de pasivación en la superficie del metal limita la tasa de corrosión uniforme afectando la difusión del control de la concentración.

2.6. CORROSION DE LAS TUBERIAS DE COBRE

Los problemas asociados a la corrosión del cobre en las tuberías se relacionan con la formación de agujeros en la superficie lo que genera una falla en el sistema (American Water Works Association, 1996). Lane R, 1993 observó que los niveles más altos de cobre en el agua potable se presentan durante las noches, cuando el agua se encuentra en reposo en las tuberías. Knobeloch L, 1998 recomienda que se deje correr el agua en las mañanas después del periodo de reposo, de esta manera disminuirá los niveles de cobre en el agua potable.

Calle G, 2007; Merkel T, 2006 establecen que la corrosión en las tuberías de cobre se divide en los siguientes tres procesos: la oxidación del cobre metálico, la formación de la capa de óxido y la disolución y transporte del cobre disuelto de su superficie en el agua; como se muestra en la Ilustración 2.

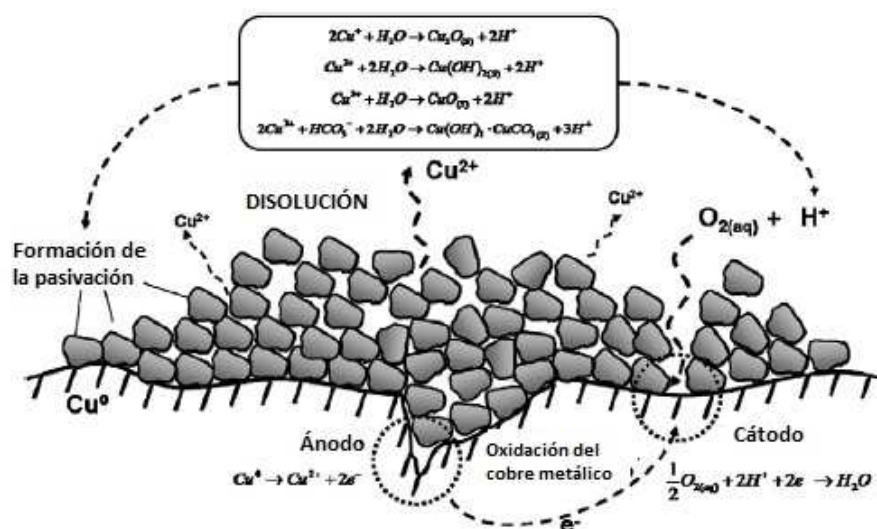


Ilustración 2 Corrosión del cobre. Fuente: (Vargas I, 2010)

WHO, 2003 determinó que el 20% de los valores de cobre medidos en el agua que llega a los domicilios se encuentran más altos que los valores medidos en las plantas de tratamiento. Edwards M, 2002 presenta que en el agua potable las concentraciones de cobre pueden incrementar debido a niveles bajos de pH, alta alcalinidad y tiempo de estancamiento; lo que puede generar corrosión de las tuberías. Mientras que varios estudios (Atlas D, 1982; Boulay N., Edwards M., 2001; Cantor A, 2003) determinan que agentes oxidantes como el cloro contribuyen en el incremento de las concentraciones de cobre en el agua.

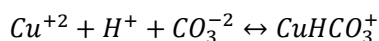
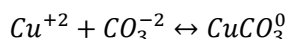
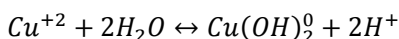
Lane R, 1993 estableció que las variables que afectan la cantidad de cobre disuelto en el agua son: la calidad, temperatura, velocidad del agua y el tiempo de estancamiento. Sharrett A, 1982 observó que la edad del sistema de tuberías es un factor importante en la disolución del cobre, debido a que los sistemas nuevos presentan altos niveles de disolución del cobre comparado con los sistemas antiguos, puesto que los sistemas antiguos han desarrollado una capa protectora o película de pasivación (Cantor A, 2003; Schock M & Lytle D, 2011).

El potencial de oxidación-reducción es un factor de importancia que se ha investigado recientemente. Debido a que el potencial redox varía con el pH y la temperatura, pero fundamentalmente en presencia de distintos tipos y concentración de desinfectante en

el agua. Los estudios de laboratorio planteados por (Copeland A & Lytle D, 2014; James C, 2004) muestran valores altos del potencial redox en presencia de cloro residual y dióxido de cloro. Esto demostró que la influencia del cloro residual en el potencial redox es mucho mayor que el que ejerce el oxígeno disuelto. Por lo tanto, en los sistemas con cloro residual en la distribución del agua potable, la influencia del oxígeno disuelto en el potencial redox es mucho menor.

Debido que las tuberías de cobre se encuentran expuestas a una variedad de características del agua como la variación del pH, alcalinidad y agentes oxidantes como el cloro y el oxígeno disuelto, se asume que el cobre se presente en las tres valencias de oxidación (0, +1 y +2) en el agua de distribución (Schock M, 1995). Como resultado de la oxidación del cobre es común la presencia del ion cuproso (Cu^{+1}) y el ion cúprico (Cu^{+2}) en el agua de consumo humano (Palit A, 2000).

Edwards M, 1996 estableció que la concentración total del cobre disuelto puede ser determinado por la suma de las concentraciones de las especies acuosas de cobre dominantes como: Cu^{+2} , $\text{Cu}(\text{OH})_2(\text{aq})$, $\text{CuCO}_3(\text{aq})$ y CuHCO_3^+ . En el rango de pH de 7 a 8,5 del agua potable, las concentraciones de las otras especies de cobre en el agua son despreciables (Schock M, 1995). Las reacciones de equilibrio de las especies dominantes se muestran a continuación:



De esta manera, a lo largo de la corrosión uniforme del cobre en el interior de las paredes de las tuberías de distribución de agua potable, la tubería actúa como ánodo desprendiendo iones cuprosos y cúpricos en el agua. Los iones cuprosos son casi comúnmente encontrados en la interfaz metal-agua, mientras que los iones cúpricos se encuentran en mayor cantidad disueltos en el agua, lejos de la superficie del metal (Nadja F, 2006).

El ion cuproso puede formar varios complejos estables en solución con amonio ($\text{Cu}(\text{NH}_4)_2^+$) y con cloro (CuCl_2^- , CuCl_3^{-2} , CuCl_4^{-3}) y puede formar óxido cuproso sólido o cuprita ($\text{Cu}_2\text{O}(\text{s})$) antes de ser oxidado a la forma cúprica. Las concentraciones del cobre disuelto dependen de las propiedades físicas y solubles de los sólidos de cobre presentes en las paredes de las tuberías, a partir del Cu^{+1} y Cu^{+2} .

2.6.2. Formación de la película de pasivación

Cuando un metal se encuentra expuesto a ambientes corrosivos tienden a formar capas protectoras a partir de los productos de corrosión o por la absorción de oxígeno, estas capas generalmente reducen el proceso corrosivo del metal mientras esta permanezca intacta puesto que si se ve expuesta a alteraciones, la resistencia a la corrosión disminuye (Schweitzer P, 2007). Existen dos teorías de la formación de estas capas, una que establece la formación de la capa a partir de la oxidación del metal conocida como *teoría de la capa de óxido*, la cual actúa como una barrera que disminuye la tasa de corrosión del metal. La segunda establece que el oxígeno es adsorbido por la superficie formando una capa que reacciona a través del tiempo y disminuye la tasa de disolución anódica relacionada con la hidratación de iones metálicos. Es conocida como la *teoría de la adsorción* (Winston R & Herbert H, 2008).

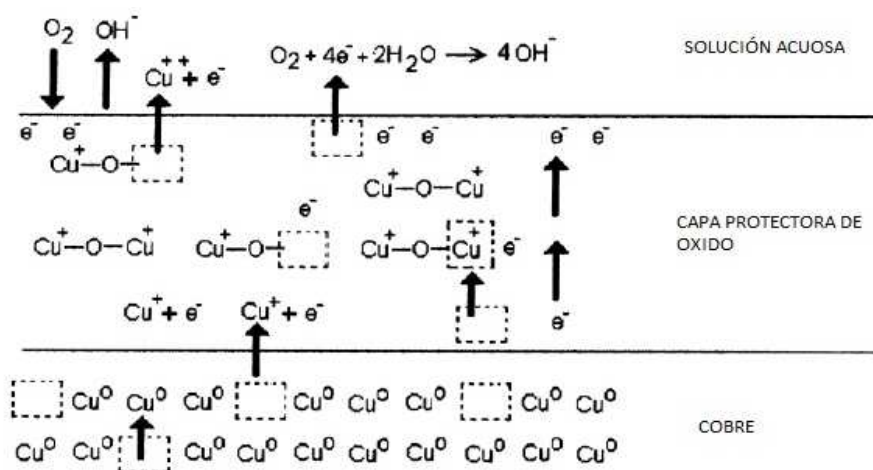


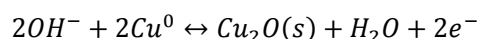
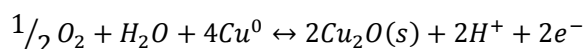
Ilustración 3 Representación esquemática de la formación de la capa de pasivación. Fuente: (Gallegos A, 2005)

Gallegos A, 2005 señala que la formación de la capa de pasivación o la oxidación del cobre sigue el siguiente mecanismo presentado en la Ilustración 3: las paredes de cobre compuestas por Cu^0 se oxidan a Cu^+ . Luego, el ion cuproso se mueve para llenar los espacios en la estructura de cobre, y el oxígeno en la superficie del metal continúa el proceso de oxidación al ion cúprico (Cu^{++}). Cuando el oxígeno recibe electrones del ion cuproso se forma la estructura de la capa de óxido y el ion Cu^{++} se disuelve en la solución. Los espacios en la estructura de la capa de óxido pueden ser rellenados con otros iones cuprosos, de esta manera se mantiene el proceso de oxidación.

En el caso del cobre bajo ambientes corrosivos la superficie expuesta forma una coloración verde conocida como patina, es un producto de la corrosión que actúa como capa límite entre los electrolitos del medio y la superficie del metal, protegiéndolo de la

corrosión futura. Copper Development Association, 2005 determinó que en aguas con un adecuado oxígeno disuelto y pH entre 7,2 y 8,5 generan las óptimas condiciones para que la capa de pasivación pueda ser formada. Aproximadamente se forma en las primeras 200 horas del contacto entre el cobre y el agua oxigenada, luego de este tiempo sigue formándose más lentamente. Para mantener esta capa protectora es necesario establecer un control en la velocidad del agua y su temperatura (Lane R, 1993).

Para la formación de la capa de pasivación se presentan reacciones entre la superficie de las paredes internas de la tubería con el agua. Ives D & Rawson A, 1962 determinaron que la cuprita es formada en contacto de cobre y el agua con la reducción del oxígeno en las reacciones anódicas:



Feng Y, 1996 determinó que la difusión de iones de cobre a través de la capa de pasivación limita y retarda el proceso de la corrosión de cobre. Schock M & Lytle D, 2011; Schock M & Sandvig A, 2012; Zhang Z, 2007, determinaron que los óxidos de cobre más comunes presentes en la formación de la capa de pasivación son: cuprita (Cu_2O), Hidróxido cúprico ($Cu(OH)_2$), tenorita (CuO) y malachita ($Cu_2(OH)_2CO_3$).

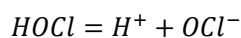
2.6.3. Efecto del cloro residual

Rodolfo A, 1987 Determinó una posible influencia del cloro en el proceso electroquímico de corrosión, observó que existe una mayor tasa de corrosión en sistemas de agua con concentraciones normales (1mg/l) de cloro residual, incluso determinó que existe una mayor tasa de corrosión en sistemas clorados y en presencia de oxígeno disuelto que los sistemas oxigenados y sin cloro. Esto sugiere que el cloro o las especies disueltas de cloro son cátodos más poderosos que el oxígeno disuelto.

Cuando el agua es clorada, ocurren las siguientes reacciones espontaneas:



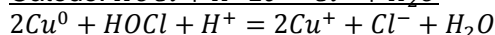
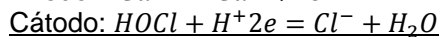
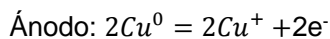
Después el HOCl se disocia:



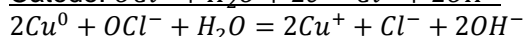
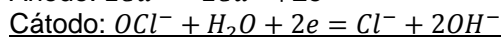
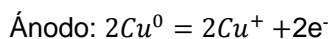
De esta manera, en el rango común de pH encontrado en sistemas de agua potable el ácido hipocloroso HOCl y el ion hipoclorito OCl^- coexisten como cloro libre residual. Se

puede determinar mediante el pH las cantidades relativas de cada especie de cloro, debido que participan en el cátodo en las reacciones del proceso de corrosión:

pH ácido a ligeramente básico:

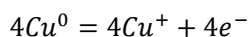


pH básico:

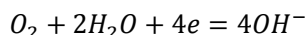
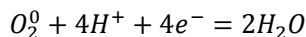


Del pH neutral al básico, cantidades significativas de HOCl puede estar presente para servir como reactivo en la reducción catódica. En el agua solo con O₂ sin cloro ocurren las siguientes reacciones:

Ánodo:



Posibles reducciones catódicas:



Bajo condiciones ácidas, la transformación reductiva del O₂ a agua es más favorecida. Cuando el pH se vuelve moderadamente básico ambos procesos catódicos pueden estar presentes.

Un análisis de las reacciones de media celda indica que, a bajo pH, el HOCl y el O₂ son fuertes agentes oxidantes. Mientras que, al incrementar el pH, el O₂ pierde su habilidad oxidante más rápido que el HOCl con un factor de dos a uno. Esto sugiere que la corrosión del cobre es termodinámicamente mucho mayor en presencia de cloro que únicamente con O₂.

Se ha observado que el cloro y sus productos de reacción pueden causar daños por corrosión en metales en contacto con sistemas de agua. Francis R, 1982 mediante un estudio electroquímico demostró que el cloro causa la formación de diferentes o modificadas capas en aleaciones de cobre.

2.7. REGLA DEL PLOMO Y COBRE (LCR, LEAD AND COPPER RULE)

La Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos, en un intento de disminuir el consumo de plomo en el agua potable pública, estableció la Regla del plomo y cobre o Lead and Copper Rule en inglés (LCR) en 1991 (EPA, 2013). En la LCR se establece toma de muestras de agua potable en los hogares que puedan estar con altos riesgos de niveles elevados de plomo y cobre. El número de sitios y la frecuencia del muestreo depende del número de usuarios de cada vivienda.

Si el 10% de las muestras contiene o sobrepasa 15 ug/L de plomo o 1300 ug/L de cobre (EPA, 2008), se debe preparar un Tratamiento Óptimo del Control de la Corrosión (OCCT). Si después de ser aplicado el OCCT, el servicio excede los niveles nuevamente se debe reemplazar hasta el 7% del sistema de tubería.

2.7.1. Problemas de salud relacionados con las concentraciones de cobre

En varias formas de vida el cobre se encuentra como un elemento esencial en pequeñas concentraciones. En el cuerpo humano, el cobre es utilizado para la formación de enzimas y proteínas que desempeñan distintas funciones. El Institute of Medicine of the National Academies, 2000 recomienda un límite de cobre de 700-900 ug/día para adultos y 200-440 ug/día para niños. Con el fin de mantener niveles de cobre inofensivos para la salud humana se han desarrollado normativas como el LCR. Debido que altas concentraciones de cobre en el cuerpo humano tiende a generar desordenes gastrointestinales como náuseas, vómito, dolor de estómago y diarrea, especialmente en niños (Pontius F, 1998; Schroeder H, 1966). USDHHS., 2004 presenta que personas con desordenes genéticos tienden a acumular grandes cantidades de cobre en el hígado y riñones.

2.8. TESTS DE CORROSION

Las pruebas de corrosión son ampliamente usadas para evaluar la durabilidad de los materiales de construcción en distintos ambientes. Estas evalúan el proceso de degradación del material que afecta el desempeño final de cada material escogido para diferentes aplicaciones. Además, es posible desarrollar estrategias de protección para cada material, ayudan a determinar la corrosividad de ambientes específicos y a establecer el impacto de la corrosión en el tiempo de vida útil de los materiales. La calidad de los datos generados por pruebas estándar han sido señaladas por distintas revisiones y evaluaciones críticas, y sus resultados pueden ser fácilmente comparados con otros obtenidos usando el mismo test (Baboian R, 2005).

Baboian R, 2005 establece que las pruebas de corrosión deben confrontar varios tipos de corrosión, incluyendo la corrosión uniforme, corrosión galvánica y varias formas de corrosión localizada, que fácilmente pueden provocar la ruptura del material sin presentar un daño uniforme.

Conocer el mecanismo y la cinética de los procesos de corrosión específica bajo ciertas condiciones generan la base fundamental para desarrollar la prueba de corrosión en ambientes específicos para cada tipo de material usado en distintas aplicaciones. Las pruebas in-situ producen información de tasa de corrosión uniforme, tipos de ataque y la tendencia a la formación de hoyos en la superficie del metal. La tasa de corrosión uniforme puede ser determinada por métodos electroquímicos o pruebas de pérdida de peso. Ambos métodos generan promedios de tasas de corrosión sobre el área expuesta de los especímenes (Baboian R, 2005). Ya que este proyecto evaluó el efecto del cloro residual en el agua potable de distribución en las tuberías de cobre usadas en las conexiones domiciliarias, se usó el test de pérdida de peso para cupones de cobre expuestos a condiciones del sistema de distribución de agua potable y de la planta de tratamiento.

2.8.1. Test de pérdida de peso

Son pruebas simples que determinan una tasa de corrosión uniforme basada en la inmersión de cupones del metal de interés en un medio mediante el análisis de la pérdida de peso. Estas pruebas generan información de la tasa de corrosión del metal comúnmente expresadas en unidades inglesas como milésimas de pulgada por año (mpy) o en el sistema métrico como milímetros por año (mm/y) (Baboian R, 2005).

Los metales expuestos a un medio corrosivo tienden a unirse químicamente con los elementos del entorno corrosivo formando compuestos similares a los que se encuentran en la naturaleza, provocando pérdidas del metal como productos de la corrosión (Schweitzer P, 2007). Este tipo de corrosión ataca la superficie del metal expuesta causando una corrosión uniforme a lo largo de su superficie. Esta forma de corrosión tiene una fácil medición y predicción mediante tasas de corrosión expresadas en términos de la pérdida de peso del metal por unidad de tiempo. Al realizar estas mediciones es necesario considerar que la pérdida de peso del metal se atribuye a la disolución de los componentes metálicos a iones metálicos generando una contaminación por los productos de corrosión en el entorno.

El test de pérdida de peso consiste en preparar cupones del metal, limpiarlos antes de las pruebas, pesarlos antes de instalarlos, exponerlos a un medio corrosivo, retirarlos luego de un tiempo de exposición determinado, para posteriormente remover los

productos de corrosión y finalmente pesarlos nuevamente para determinar la pérdida de peso.

El tiempo de exposición, la pérdida de peso, la superficie del área expuesta y la densidad del metal son usados para calcular la tasa de corrosión del metal, mediante la transformación de la medición del peso perdido a volumen perdido del metal usando la densidad del material, luego se divide el volumen perdido para el área del metal expuesto y el tiempo de exposición (Baboian R, 2005).

Una vez terminada la prueba, la tasa de corrosión puede ser calculada a partir de pérdida de peso del material usando la siguiente ecuación:

$$TC = \frac{K*W}{A*T*D} \text{ Ec. 1}$$

Donde:

TC= Tasa de corrosión (mpy)

K= Corresponde a una constante para el ajuste de unidades

W= Pérdida de peso del cupón (g)

A= Área (cm²)

T= Tiempo de exposición (h)

D= Densidad del cobre (8,94 g/cm³)

ASTM G1, 2011 señala que la Tasa de Corrosión (TC) puede ser calculada en varias unidades usando el apropiado valor de K. Para calcular la TC en mpy (milésima parte de pulgada por año) se utiliza la constante K=3,45x10⁶, para calcular la TC en mm/y (milímetros por año) se utiliza la constante K=8,76x10⁴.

La Tasa de Corrosión (TC) obtenida a partir de la fórmula, representa un promedio anual de corrosión que se expresado en mpy o mm/y cuyos rangos que presenten valores más elevados indicaran una mayor presencia del proceso corrosivo a lo largo del sistema. Como se puede observar en la Tabla 1 para cobre y aleaciones de cobre según AWT:

Tabla 1 Rangos de Tasas de corrosión para tuberías de cobre. Fuente: (Baboian R, 2005)

Rango de mpy	Rango de mm/y	Interpretación
≤0.1	≤0.003	Sin presencia de corrosión
0.1-0.2	0.006-0.009	Ligera corrosión
0.2-0.3	0.009-0.0125	Moderada corrosión
0.3-0.5	0.0125-0.03	Severa corrosión
≥0.5	≥0.03	Inaceptable

Para asegurar que en la superficie del metal se produce una corrosión uniforme, se puede dividir la pérdida del espesor para la duración de las pruebas en años. El resultado se puede comparar con los resultados obtenidos mediante la fórmula. Si al compararlos existe una diferencia insignificante quiere decir que en la superficie del cupón se presentó una corrosión uniforme.

2.9. VIDA REMANENTE DE LAS TUBERÍAS DE COBRE.

Entre uno de los efectos de la corrosión en las tuberías de cobre es la disminución del tiempo de vida útil de las tuberías. La degradación de la pared interna de la tubería genera pérdida del metal identificada como corrosión localizada o uniforme. Una degradación progresiva puede producir la disminución del espesor requerido por las tuberías de cobre hasta niveles en los cuales la tubería no pueda soportar la presión ejercida por el transporte de agua o puede ser susceptible a un cambio en la velocidad del fluido que transporta (Sharifi M, 2015). La vida remanente de la tubería se calculó a partir de la siguiente ecuación (Mendoza J, 2006):

$$V_{remanente} = \frac{t_{real} - t_{requerida}}{TC} \quad Ec. 2$$

Donde:

$V_{remanente}$: Tiempo estimado de vida remanente. (años)

t_{real} : Espesor real de la tubería (milímetros)

$t_{requerida}$: Espesor mínimo requerido en función de la presión y velocidad del agua. (milímetros)

TC: Tasa de corrosión (mm/y).

En el sistema de distribución de agua potable se presentan tuberías con alto potencial de ocurrencia de falla debido a la alta tasa de corrosión en diferentes zonas. Por lo tanto, se debe considerar que una vez que comienza la corrosión la tubería es más susceptible a una rotura por la acción de la presión o la velocidad del agua.

Según las especificaciones del manual técnico (Nacobre S.A, 2016) las tuberías de cobre tipo K ocupadas en las conexiones domiciliarias de agua potable, deben presentar un espesor de 1,6 mm de la pared de la tubería. Ya que ese espesor es probado y especificado para las presiones comunes que se generan en esas zonas de distribución. Por lo tanto, se asume que si el espesor de la pared pierde al menos el 50% del espesor inicial este no podrá cumplir con las especificaciones requeridas. Esto puede generar fallas o roturas en la tubería, lo que significa que su vida útil finalizo.

CAPITULO 3

3. METODOLOGIA

3.1. DISEÑO DEL TEST DE PERDIDA DE PESO

Bajo la guía estándar para la elaboración de Test con cupones de corrosión en aplicaciones de campo (Standard Guide for Conducting Corrosion Coupon Tests in Field Applications ASTM G4, 1995) se diseñó el test de pérdida de peso. La medición de la corrosión durante el tratamiento y la distribución del agua facilitan establecer las condiciones óptimas del agua potable, con la finalidad de limitar o detener algún proceso corrosivo (Slavickova, 2013).

El test de pérdida de peso es una técnica usada ampliamente por ser un método simple de evaluación, está basado en la medición precisa de la disminución de peso de los cupones del metal de interés. Mediante la evaluación del rango de degradación del material expuesto a procesos, reacciones químicas y electroquímicas, que afectan el desempeño del material en un periodo de tiempo. De esta manera se genera un desgaste uniforme del cupón que puede ser calculada a partir de la ecuación de la tasa de corrosión (Baboian R, 2005). Esta prueba es ejecutada en laboratorio y en pruebas de planta.

Slavickova K, 2013 describe que el tiempo usual de exposición varía de 30, 60 o 90 días, debido a que las tasas de corrosión son mucho mayores durante las primeras horas o días. Esta mayor tasa de corrosión ocurre durante y hasta que la superficie del metal adquiera pasivación (Bennett P., 2011).

Las tasas de corrosión medidas por los cupones de corrosión son el resultado del tiempo promedio de pérdida del metal del cupón (Bennett P., 2011), calculadas empleando la Ecuación 1. De esta forma se puede predecir cuantas milésimas de pulgada puede perderse del metal en un periodo de un año sujetos a las condiciones corrosivas del sistema.

3.2. MATERIALES

3.2.1. Cupones de corrosión

Los cupones de cobre a implementar fueron elaborados a partir de tubos de cobre rígidos tipo K usados por la empresa EMAPAL en las conexiones domiciliarias (acometidas), debido a su fácil manejo de sus características y porque es usado ampliamente en tuberías domésticas. Baboian R, 2005 establece que los cupones

deben ser suficientemente largo para minimizar la relación de los bordes con el área superficial total.

Las dimensiones de los cupones fueron: 7.6 cm de largo, 1.3 cm de ancho, 1 mm de espesor y un agujero de 5mm de diámetro en la parte superior para sostenerlo, como se muestra en la Ilustración 4 (Louise M, 1985). La orientación y la posición que presenten los cupones se fijaron de tal manera que todas las caras del cupón se encuentren en contacto con el agua objeto de estudio. Así, el área expuesta fue de 21,15 cm². Cada cupón fue pesado e instalado en un “porta cupón” para su implementación.

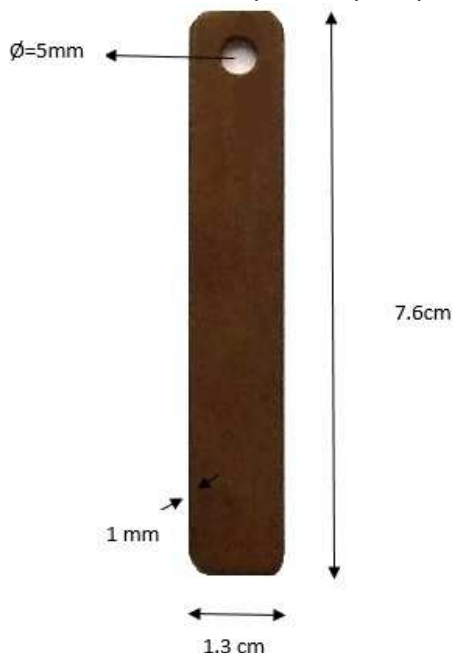


Ilustración 4 Cupón de cobre. (Fuente: Autor, 2017)

3.2.2. Portacupón

Bennett P., 2011 recomienda que el portacupón tenga un diámetro de 0.5 pulgadas y un largo de 3 pulgadas, como se muestra en la Ilustración 5. El material del portacupón fue construido con grilon. Al final del portacupón se instaló el cupón de cobre mediante una tuerca y tornillos hechos de grilon, para evitar que se produzca efectos galvánicos por el contacto de metal con metal.



Ilustración 5 Portacupón. (Fuente: Autor, 2017)

3.2.3. Balanza analítica

En el test de pérdida de peso de los cupones de corrosión, es indispensable el uso de una balanza que permita evaluar la diferencia de peso que se genere en cada cupón a lo largo del tiempo de exposición. De esta manera se pudo analizar cambios pequeños en la diferencia de masa antes y después de que los cupones fueron instalados en cada lugar de análisis. La balanza utilizada a lo largo del proceso es de marca Sartorius, del Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad de Cuenca, esta balanza cuenta con una precisión de 4 decimales como se muestra en la Ilustración 6:



Ilustración 6 Balanza Analítica. (Fuente: Autor, 2017)

3.3. PREPARACIÓN Y LIMPIEZA LOS CUPONES

Antes de pesar e instalar los cupones, estos fueron limpiados para remover grasa, polvo y huellas digitales. El proceso de limpieza para el test de pérdida de peso se lo realizó mediante sustancias químicas propias para cada material, como se recomienda en las guías de la Practica para preparación, limpieza y evaluación de los especímenes de los test de corrosión (Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluationg Corrosion Test Specimens ASTM G1, 2011). Para la limpieza de cupones de cobre se utilizó ácido clorhídrico y agua destilada como muestra la Ilustración 7.

Antes de la implementación, los cupones se limpiaron con 500 ml de ácido clorhídrico en 1000ml de agua, durante 1 minuto (ASTM G1, 2011; Baboian R, 2005; Haseeb, 2009). De igual manera cuando se retiraron los cupones nuevamente fueron limpiados

con ácido clorhídrico y agua destilada, removiendo el material que se encuentre en la superficie de los mismos como se muestra en la Ilustración 8. De tal manera que estos residuos no afecten en el peso final, variando los resultados (EnviroAqua, 2012).

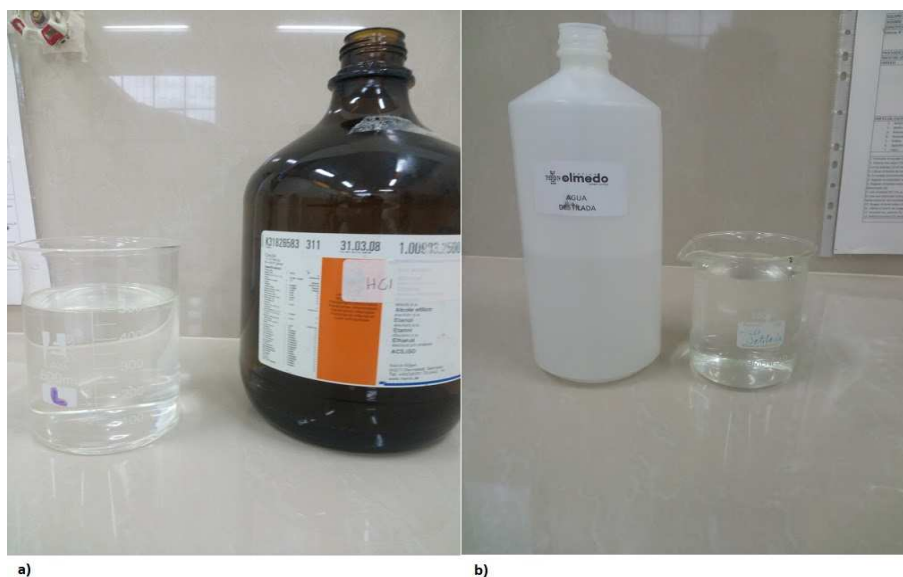


Ilustración 7 a) Ácido clorhídrico b) Agua destilada. (Fuente: Autor, 2017)

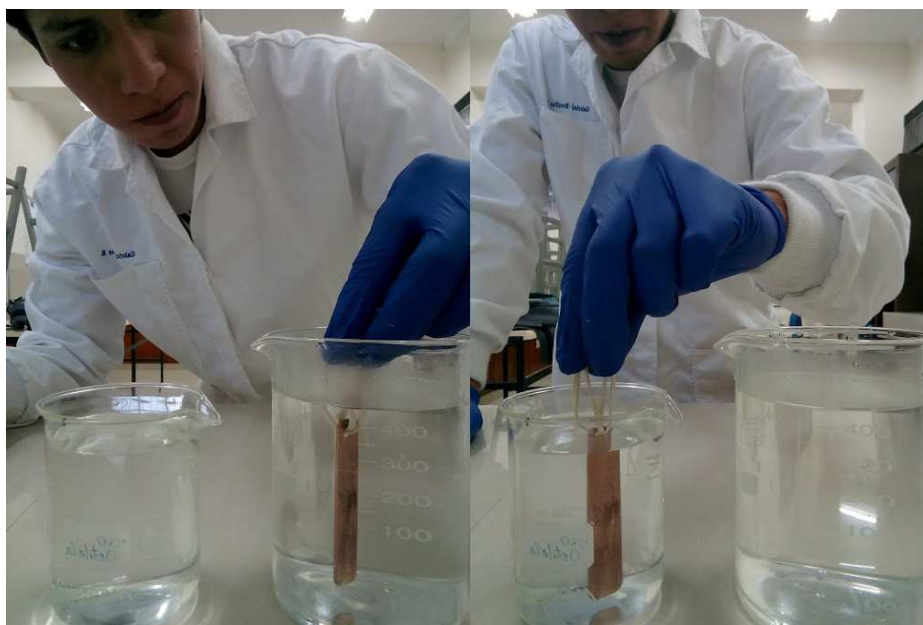


Ilustración 8 Limpieza y preparación de los cupones. (Fuente: Autor, 2017)

3.4. TIEMPO DE EXPOSICIÓN

Baboian R, 2005; Bennett P., 2011; Rodolfo A, 1987 recomienda que el tiempo de exposición para cupones de corrosión instalados en una cuponera es de mínimo 30 días. Por lo tanto, se analizaron tasas de corrosión en cortos y largos periodos. En los cortos periodos de exposición se evaluaron cupones expuestos a tiempos de 30 y 60

días, para periodos largos 90 y 180 días, generando un promedio de la tasa de corrosión para cada tiempo de exposición. Los cupones fueron instalados en pares y reemplazados de forma cíclica, de esta manera se obtuvo promedios de tasas de corrosión para determinados tiempos de exposición. Los periodos más largos (90 y 180 días) determinaron el “promedio de estado estacionario” de la tasa de corrosión.

De esta manera se instalaron 6 cupones, los cuales fueron dispuestos de la siguiente manera: dos cupones para el periodo de 30 días, dos para el periodo de 90 días, dos para el periodo de 180 días. Una vez finalizado los 30 días se retiraron los primeros cupones y fueron reemplazados por dos cupones de 60 días, después de los noventa días los dos siguientes cupones fueron reemplazados por dos nuevos cupones que se expondrán por un año, para un posterior estudio.

3.5. LUGAR DE EJECUCIÓN DE LA PRUEBA.

Los análisis para la determinación de la velocidad de corrosión en tuberías de cobre se realizaron en tres zonas, las cuales se describen a continuación:

3.5.1. INCORPORACIÓN DE CUPONES DE COBRE EN LA PLANTA DE POTABILIZACIÓN DE LA CIUDAD DE AZOGUES.

La corrosión de las tuberías de cobre en los sistemas de agua potable generan fugas, las condiciones para que se produzcan estas fugas son difíciles de simular en laboratorios (Sarver E, 2011). Los ensayos de (Nguyen C, 2011) (Rodolfo A, 1987) han reproducido algunas características agresivas del agua mediante la preparación de soluciones con distintos niveles de pH y alcalinidad similares a las normales que se presentan en las plantas potabilizadoras y el sistema de distribución.

Las pruebas in-situ generan información de tasa de corrosión y tipos de corrosión por los efectos de la variación de los parámetros de operación del sistema. Por lo tanto, se planteó la inmersión de cupones de cobre en la Planta de Potabilización de la ciudad de Azogues con la finalidad de que los cupones se expongan a las condiciones propias de un sistema de agua potable. Los cupones fueron expuestos a las mismas condiciones de temperatura, flujo del agua, alcalinidad y todos los parámetros controlados por la Planta Potabilizadora en distintos tiempos de exposición y concentraciones de cloro establecidas por el proceso de potabilización. De esta manera se estableció una relación entre la concentración del cloro y el tiempo de exposición con la tasa de corrosión.

Se ubicaron cupones de cobre en el canal de interconexión posterior a la filtración y antes de la cloración de tal manera de tener los cupones en un agua sin cloro y en un

segundo punto se instalaron cupones en los tanques de almacenamiento ubicados posterior a la cloración de tal manera de tener los cupones en contacto con agua clorada.

3.5.1.1. Canal de interconexión de los Filtros

Los cupones se instalaron en el canal de interconexión posterior a los filtros, donde el agua se distribuye hacia la zona de cloración, mediante la incorporación de alambres fijados en la parte alta del canal de distribución. Los alambres fijaron los cupones a una altura de 8cm desde el nivel más bajo del canal, como se muestra en la Ilustración 9. De esta manera se evitó que los cupones entren en contacto con el aire cuando los filtros se lavan o se encuentran inactivos, puesto que los canales nunca se vacían completamente.



Ilustración 9 a) Zona de filtración; b) Canales de distribución; c) Cupón. (Fuente: Autor, 2017)

3.5.1.2. Tanques de almacenamiento

Durante la potabilización, al mantener un volumen constante de agua en los tanques de almacenamiento y una dosificación de 1,5 mg/l de cloro (siempre que no varíe el caudal)



Ilustración 10 a) Tanques de cloración; b) Parte superior del tanque; c) Cupón. (Fuente: Autor, 2017)

en la planta de tratamiento, permite que la concentración de cloro en los tanques sea de 0,8 a 1 mg/l.

De la misma manera se fijaron los cupones adecuadamente desde la parte superior de los tanques de almacenamiento, manteniendo los cupones a una altura de 20 cm desde el fondo del tanque. De esta manera se evitó el contacto del aire con el cupón cuando el tanque se vació para su limpieza. Como se muestra en la Ilustración 10.

3.5.2. CUPONERA.

Estos sistemas de tuberías son ideales para estudiar los impactos de corrosión en sistemas de distribución (Kirmeyer G, 1993). La cuponera fue construida de materiales que no contribuyen a la corrosión ni provoquen una inhibición de la corrosión. Por lo tanto, se usó tubos de PVC de 1 pulgada de diámetro. El diseño propuesto presentó seis secciones horizontales de 70 centímetros y seis secciones verticales de 20 centímetros. Los ángulos rectos del sistema fueron diseñados para insertar los portacupones, se ubicaron 6 portacupones e instalaron 6 cupones de cobre en cada uno como se muestra en la Ilustración 11.



Ilustración 11 Cuponera. (Fuente: Autor, 2017)

Mediante la válvula de flujo se mantuvo el caudal constante para que la velocidad del fluido del agua no produzca turbulencia en los lugares que ocupan los cupones, evitando variaciones de las tasas de corrosión. La presión del sistema se contralaba mediante un medidor instalado en la entrada de agua como se muestra en la Ilustración 12. Se debe mantener tasas constantes de flujo ya que alteraciones en los resultados de la tasa de corrosión en los cupones genera dificultades en la interpretación de los resultados (ASTM G4, 1995; EnviroAqua, 2012).



Ilustración 12 Válvula de flujo y Medidor de Presión. (Fuente: Autor, 2017)

3.5.2.1. Orientación de los cupones

Bennett P., 2011 establece que el cupón debe ser orientado con la cara ancha en posición vertical, evitando la acumulación de partículas en la cara del cupón, lo que podría acelerar la corrosión por erosión. El portacupón presentó una marca que identifica el borde plano del cupón para mantener la correcta orientación durante la instalación como se muestra en la Ilustración 13.



Ilustración 13 Orientación de los cupones. (Fuente: Autor, 2017)

3.6. ANÁLISIS DE LA CONCENTRACIÓN DE CLORO.

La concentración de cloro en la planta de tratamiento de EMAPAL fue obtenida de los datos recolectados por la empresa, la cual utiliza el Método Estándar DPD 8021, aceptado por la USEPA para análisis de agua potable mediante el colorímetro HACH DR/890 (HACH Co., 2013). En los canales de interconexión de los filtros se estableció que la concentración de cloro en el agua es de 0 mg/l. Mientras que, en los tanques de

almacenamiento en el proceso de potabilización, a partir del promedio de la dosificación de cloro en los tanques (1,5 mg/l Cl₂) durante el tiempo de exposición, se obtuvo un promedio de cloro residual de 0.85 mg/l.

Por otro lado, para establecer la concentración de cloro en la cuponera se obtuvo un promedio obtenido en la evaluación de cloro residual en la red de distribución de la ciudad de Azogues de la investigación de (Guanuchi C & Ordoñez J, 2017) ,para la vivienda en la cual se instaló la cuponera. El promedio de cloro residual a partir de las mediciones realizadas para la vivienda fue de 0,37 mg/l.

3.7. TEST DE INMERSIÓN ESTÁTICA.

El test de inmersión estática es una prueba de laboratorio en el que se evalúa un metal de interés expuesto a un periodo de tiempo y es removido para su examinación (Baboian R, 2005). Se asume que la tasa de corrosión permanece constante con el tiempo, aunque esto no es completamente válido. Puesto que, mientras el ambiente permanezca estático a través del tiempo la tasa de corrosión puede disminuir hasta que el metal adquiera la capa de pasivación. Se utiliza esta prueba para establecer una relación entre la concentración de cobre disuelto por los cupones de cobre expuestos a distintas concentraciones de cloro en un periodo de 30 días. De esta manera se determinó como varia la liberación de cobre en el agua.

La prueba de laboratorio debe simular la química del agua y las condiciones de operación de un sistema de agua potable (Baboian R, 2005). Por lo tanto, para la preparación de las soluciones se usó el agua del sistema de agua potable. La evaluación de tasa de corrosión se llevó a cabo de acuerdo con el método técnico, prueba cualitativa (Haseeb, 2009). Para esta prueba se prepararon soluciones con diferentes concentraciones de cloro (0,25 mg/l; 0,5mg/l; 0,75 mg/l; 1mg/l; 2mg/l; 5mg/l) y una solución de control de agua destilada.

3.7.1. Preparación de las soluciones

Para la preparación de las soluciones a utilizar en el protocolo de vaciado y rellenado de cada concentración se realizó el siguiente proceso:

1. Tomar un litro de agua del grifo
2. Medir la concentración (mg/l) de cloro residual con el colorímetro HACH DR/890 mediante el Método Estándar DPD 8021, aceptado por la USEPA para análisis de agua potable y agua residual (HACH Co., 2013).

3. Añadir cloro sólido para aumentar la concentración del cloro en el agua o añadir agua para disminuir el cloro del agua. Esto dependerá de la concentración del cloro residual del agua en los días que se preparen las soluciones.



Ilustración 14 Test de inmersión estática. (Fuente: Autor, 2017)

Nguyen, 2005 estableció que el cloro residual tiende a disminuir rápidamente en tuberías de cobre y aleaciones durante el estancamiento. Por lo tanto, se evaluaron concentraciones altas y bajas y de esta manera se logró establecer alguna variabilidad en los niveles de cloro a lo largo de las pruebas. Lytle D, 2011 menciona que las concentraciones altas permitirán mantener la concentración de cloro en un rango de 0.5 mg/l a 1 mg/l, mientras que las concentraciones bajas mantendrán una concentración menor a 0.5 mg/l de esta manera se pudo simular las concentraciones comúnmente observadas en las mediciones del cloro residual a lo largo del sistema de distribución de agua potable.

3.7.2. Protocolo de vaciado y rellenado.

Se colocó agua potable con las concentraciones de cloro preparadas anteriormente en vasos de precipitación de 250 ml, como se muestra en la Ilustración 14. En cada vaso de precipitación se ubicaron los cupones de cobre previamente pesados. Las soluciones se desecharon y cambiaron mediante el protocolo de vaciado y rellenado, desechando y cambiando el agua en distintos periodos de tiempo. Baboian R, 2005 presenta que el volumen del medio en el que se sumergen los cupones debe ser suficiente para asegurar que los productos de corrosión formados o disueltos en el medio sean detectables por encima del mínimo.

Las soluciones con concentraciones de 0,25 mg/l y 0,5 mg/l de Cl_2 se cambiaron cada 48 horas, las concentraciones de 0,75 y 1 mg/l de Cl_2 cada 72 horas y las soluciones de altas concentraciones de 2 y 5 mg/l cada 96 horas, durante un tiempo de exposición de 30 días. Los tiempos de reposo del agua fueron usados para evaluar los escenarios

comunes de un sistema de tuberías (Odessa S, 2013) y evitar el decaimiento total del cloro residual en cada vaso de precipitación. De esta manera se pretendió mantener una concentración del cloro constante en cada vaso de precipitación.

3.7.3. Medición del cobre disuelto.

Se midió la concentración de cobre inicial y final de cada vaso de precipitación en cada protocolo de vaciado y rellenado, con el colorímetro HACH DR/890 mediante el método 8143 para cobre en concentraciones de 0 a 210 ug/l (Hach Co., 2013). De esta manera se obtuvo un promedio de disolución del cobre para cada concentración de cloro en cada periodo de reemplazo del agua. En la Ilustración 15 se presenta una medición de la liberación de cobre mediante el uso del colorímetro.



Ilustración 15 Medición de cobre en el colorímetro. (Fuente: Autor, 2017)

Los niveles elevados de cobre usualmente no ocurren naturalmente en los suministros terrestres o superficiales de agua. Cuando los altos niveles de cobre se detectan en el agua, las tuberías domésticas de este material usualmente es la fuente. La EPA de los Estados Unidos ha establecido que el nivel máximo de contaminantes (LCR por sus siglas en inglés) para el cobre es de 1.3 miligramos por litro (mg/l), el cual también puede reportarse en partes por millón (ppm.)

3.8. ANALISIS ESTADISTICO

Para comprobar si la tasa de corrosión de los cupones de cobre se ven influenciada por la concentración de cloro en el agua, es decir que si a una mayor concentración de cloro los cupones de cobre tienden a corroerse más rápidamente. Por lo tanto, habría una

relación directa de la corrosión de las tuberías de cobre con la concentración de cloro. Se utilizó el test t de student para el análisis de diferencia de medias ($\alpha=0.05$) en la medición de la tasa de corrosión entre cada zona en la que fueron instalados los cupones (filtración 0 mg/l Cl_2 ; cuponera 0.37 mg/l Cl_2 y tanques de almacenamiento 0.85 mg/l Cl_2).

Para determinar la relación entre la concentración de cloro y las tasas de corrosión obtenidas en cada prueba, se utilizó la regresión lineal que evalúa la tendencia a incrementar o disminuir la tasa de corrosión en función de la presencia de cloro. Este análisis de regresión lineal fue realizado para cada tiempo de exposición de los cupones (30, 60, 90, 180 días). Para tener una base común de comparación entre cada periodo de exposición y para cuantificar la magnitud del efecto del cloro en la tasa de corrosión (mpy/mg L^{-1} Cl_2) se calculó la pendiente de las rectas al graficar la tasa de corrosión (mpy) vs concentración de Cl_2 (mg/l). Un análisis similar se utilizó para obtener una relación entre la pérdida de peso (ΔW) y la concentración de cloro; pérdida de peso y tiempo de exposición; tasa de corrosión (mpy) y tiempo de exposición.

Para comprobar que la relación obtenida en cada gráfica se encuentra influenciada por la concentración de cloro en el agua al que fueron expuestos los cupones, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) mediante el test F, para cada función lineal obtenida en cada caso, con un nivel de significancia ($\alpha=0.05$). Además, Mediante el análisis de regresión desarrollado en Microsoft Excel se obtuvo la significancia estadística basada en el valor p obtenido del análisis de regresión. En general, si el valor p obtenido es menor al nivel de significancia utilizado quiere decir que existe una fuerte correlación.

Para el estudio de la relación entre el cobre disuelto en el agua y la concentración de cloro en el test de inmersión estática se usó el test t de student para el análisis de diferencia de medias ($\alpha=0.05$) en la medición de la diferencia entre el cobre disuelto final y el cobre disuelto inicial en el agua a distintas concentraciones de cloro. De manera adicional se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para la regresión lineal obtenida entre la variación de la concentración de cobre y la concentración de cloro, con un nivel de significancia del ($\alpha=0.05$).

CAPITULO 4

4. RESULTADOS Y DISCUSION

Los resultados experimentales serán descritos en diferentes secciones, la primera presenta el efecto del cloro en la pérdida de peso de los cupones, la segunda evalúa el efecto del cloro en la tasa de corrosión de cobre, la tercera aborda la variación de la tasa de corrosión con el tiempo de exposición. En la cuarta sección se analiza el efecto del cloro en la corrosión por liberación de cobre. Por último, se presenta el efecto del cloro residual en las tuberías de cobre y la vida remanente de las tuberías.

4.1. Efecto del cloro en la pérdida de peso de los cupones.

Los cupones de cobre fueron instalados, retirados y evaluados en distintos periodos de exposición (30, 60, 90, 180 días), así se pudo observar una diferencia entre el peso final y el peso inicial de cada cupón para cada periodo y a distintas concentraciones de cloro (filtración 0 mg/l Cl_2 ; cuponera 0.37 mg/l Cl_2 y tanques de almacenamiento 0.85 mg/l Cl_2). La Tabla 2 indica los resultados obtenidos de la diferencia entre el peso final y el peso inicial para cada cupón en los diferentes tiempos de exposición.

Tabla 2 Pérdida de peso de los cupones para cada tiempo de exposición. (Fuente: Autor, 2017)

Tiempo de Exposición		30 días		
Lugar	Concentración Cl2 (mg/l)	Peso inicial (mg)	Peso final (mg)	ΔW (mg)
Filtración	0	9057,2	9050,1	7,1
		10045,9	10039,4	6,5
Cuponera	0,37	9230,0	9218,8	11,2
		9999,1	9986,3	12,8
Tanque de almacenamiento	0,85	9194,8	9161,3	33,5
		9867,8	9832	35,8
Tiempo de Exposición		60 días		
Lugar	Concentración Cl2 (mg/l)	Peso inicial (mg)	Peso final (mg)	ΔW (mg)
Filtración	0	9867,4	9853,6	13,8
		9084,2	9072,3	11,9
Cuponera	0,37	9225,4	9208,7	16,7
		9275,5	9258,4	17,1
Tanque de almacenamiento	0,85	9670,2	9620	50,2
		9201,2	9151,2	50
Tiempo de Exposición		90 días		
Lugar	Concentración Cl2 (mg/l)	Peso inicial (mg)	Peso final (mg)	ΔW (mg)

Filtración	0	9994,3	9974,9	19,4
		9172,1	9155	17,1
Cuponera	0,37	9692	9658,8	33,2
		9601	9570	31
Tanque de almacenamiento	0,85	10038,8	9963,7	75,1
		9538,1	9466,6	71,5
Tiempo de Exposición		180 días		
Lugar	Concentración Cl2 (mg/l)	Peso inicial (mg)	Peso final (mg)	ΔW (mg)
Filtración	0	9208	9175,1	32,9
		9782,4	9748,1	34,3
Cuponera	0,37	9247,5	9206,3	41,2
		8923,5	8884,8	38,7
Tanque de almacenamiento	0,85	9112,7	9035,6	77,1
		9765,8	9674,3	91,5

De los resultados obtenidos en la pérdida de peso de cada cupón, se realizó un gráfico de dispersión en el cual se observa la tendencia de la pérdida de peso en función de la concentración de cloro para cada periodo de exposición. La Ilustración 16 muestra que la variación de peso presenta una relación lineal con la concentración de cloro para los diferentes tiempos de exposición. En otras palabras, a mayor concentración de cloro en el agua el espécimen tiende a perder una mayor parte de su superficie uniformemente generando una variación en el peso final de los cupones.

Tabla 3 Análisis de varianza usado en el test F. (Fuente: Autor, 2017)

Efecto	Tiempo de exposición	Pendiente	Desviación estándar	Grados de libertad	F_{tabla}	F_{calculado}	Valor p (Regresión lineal)
ΔW vs Cl₂	30 días	33,643	4,11	1,4	7,71	48,1	0,002
	60 días	45,051	7,04	1,4	7,71	29,77	0,005
	90 días	65,785	6,06	1,4	7,71	85,47	0,0007
	180 días	61,234	10,43	1,4	7,71	25,02	0,007

Los coeficientes de regresión (R^2) obtenidos en la regresión lineal para los periodos de exposición de 30, 60, 90 y 180 días fueron 0,92; 0,88; 0,96 y 0,86 respectivamente. Esto significa el 92%, 88%, 96% y el 86% de los datos de la variación de la pérdida de peso es explicada por la concentración de cloro en el agua. Se realizó un análisis de varianza mediante el test F ($\alpha=0.05$). El $F_{calculado}$ es mucho mayor que el valor F_{tabla} entonces la hipótesis nula es rechazada, esto significa que la variación de la pérdida de peso es mayor en los cupones expuestos a concentraciones de cloro residual. Para cada función

lineal se realizó el análisis de regresión que indica que hay una fuerte correlación entre la concentración de cloro y la pérdida, ya que el valor p se encuentra entre 0,0007 a 0,007, como se muestra en la Tabla 3. Es decir que, la concentración de cloro afecta en forma directa a la pérdida de peso de los cupones en distintos periodos de exposición.

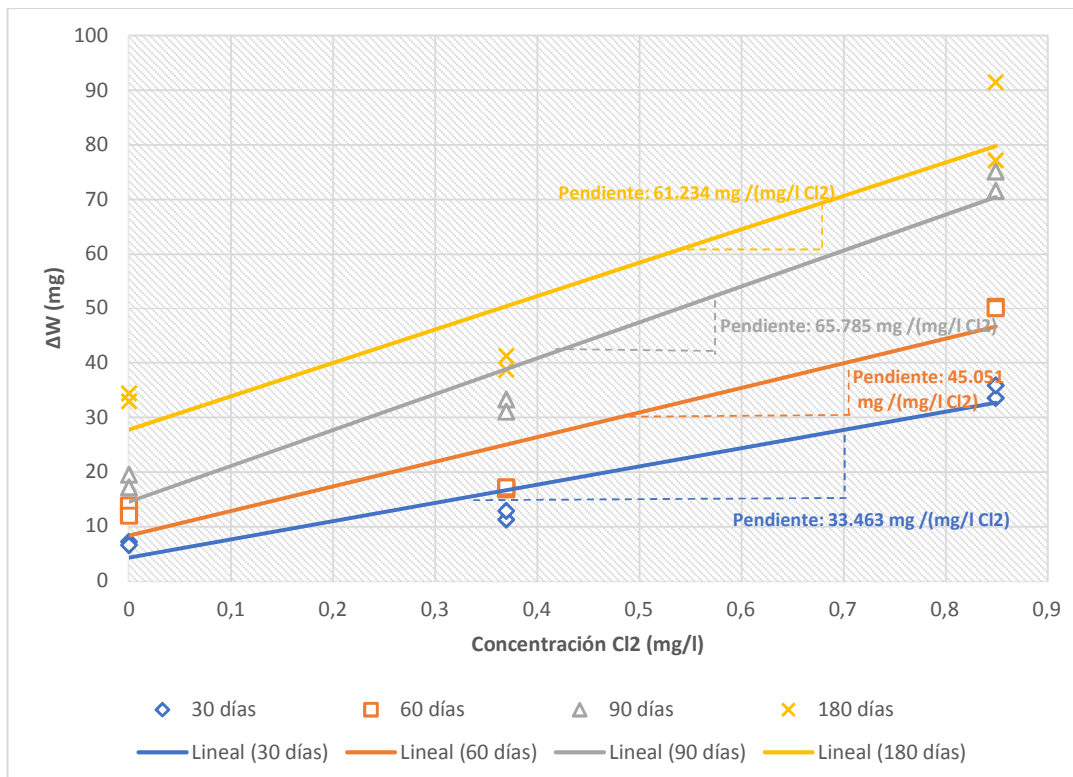


Ilustración 16 Relación de la pérdida de peso con la concentración de cloro. (Fuente: Autor, 2017)

Basados en la pendiente de la ecuación de regresión, la pérdida de peso de los cupones fue 182 por ciento más sensitiva a la concentración de cloro en un periodo de 180 días que al periodo de 30 días. Es decir que, para un nivel dado de concentración de cloro la pérdida de peso es 1.8 veces mayor en un periodo de 180 días que en el periodo de 30 días. El mismo análisis se puede realizar para comparar la pérdida de peso en los otros periodos establecidos.

4.2. Efecto del cloro en la tasa de corrosión de cobre por la pérdida de peso.

La variación de peso de los cupones de cobre fue utilizada para obtener tasas de corrosión mediante la Ecuación 1. Las tasas de corrosión obtenidas a partir de la pérdida de peso de los cupones de cobre instalados en tres zonas, (filtración 0 mg/l Cl₂; cuponera 0.37 mg/l Cl₂ y tanques de almacenamiento 0.85 mg/l Cl₂), fueron analizadas en distintos periodos de exposición (30, 60, 90, 180 días). La Tabla 4 muestra los

resultados obtenidos de la tasa de corrosión a partir de la pérdida de peso de los cupones mediante la Ecuación 1 para cada periodo de exposición.

Tabla 4 Tasa de Corrosión obtenida de la pérdida de peso. (Fuente: Autor, 2017)

Tiempo de exposición		30 días		
Lugar	Concentración Cl2 (mg/l)	ΔW (mg)	Tasa de Corrosión	
			mpy	mm/y
Filtración	0	7,1	0,1799	0,0046
		6,5	0,1647	0,0042
Cuponera	0,37	11,2	0,2838	0,0072
		12,8	0,3244	0,0082
Tanque de almacenamiento	0,85	33,5	0,8490	0,0215
		35,8	0,9072	0,0230
Tiempo de exposición		60 días		
Lugar	Concentración Cl2 (mg/l)	ΔW (mg)	Tasa de Corrosión	
			mpy	mm/y
Filtración	0	13,8	0,1749	0,0044
		11,9	0,1508	0,0038
Cuponera	0,37	16,7	0,2116	0,0054
		17,1	0,2167	0,0055
Tanque de almacenamiento	0,85	50,2	0,6361	0,0161
		50	0,6335	0,0161
Tiempo de exposición		90 días		
Lugar	Concentración Cl2 (mg/l)	ΔW (mg)	Tasa de Corrosión	
			mpy	mm/y
Filtración	0	19,4	0,1639	0,0042
		17,1	0,1444	0,0037
Cuponera	0,37	33,2	0,2805	0,0071
		31	0,2619	0,0066
Tanque de almacenamiento	0,85	75,1	0,6344	0,0161
		71,5	0,6040	0,0153
Tiempo de exposición		180 días		
Lugar	Concentración Cl2 (mg/l)	ΔW (mg)	Tasa de Corrosión	
			mpy	mm/y
Filtración	0	32,9	0,1390	0,0035
		34,3	0,1449	0,0037
Cuponera	0,37	41,2	0,1740	0,0044
		38,7	0,1635	0,0041
Tanque de almacenamiento	0,85	77,1	0,3256	0,0083
		91,5	0,3865	0,0098

A partir de los resultados obtenidos se graficaron los datos para cada periodo de exposición como se muestran en la Ilustración 17. Se puede observar que a 0 mg/l de

cloro en el agua, la variación en la tasa de corrosión para cada tiempo de exposición es mínima. También se detalla que la pendiente obtenida en la línea de tendencia en los 30 días de exposición es mayor que la pendiente de la línea en los 180 días de exposición. Mientras que las pendientes de las líneas de 60 y 90 días presentan una pequeña diferencia. Por lo tanto, se puede decir para un periodo de 30 días la tasa de corrosión es 3,2 veces mayor que en un periodo de 180 días para una concentración de cloro dada. La diferencia entre los periodos de 60 y 90 días es mínima para cada concentración de cloro dada. Mientras que, si comparamos los periodos de 90 y 180 días, la tasa de corrosión en los 90 días es 2,15 veces mayor que la de 180 días. En otras palabras, existe una mayor tasa de corrosión en los especímenes de cobre en los primeros 30 días de exposición, al aumentar la exposición a 60 días la variación de la tasa de corrosión disminuye y se mantiene casi constante al aumentar el tiempo de exposición a 90 días. Por lo tanto, en periodos medios de exposición la tasa de corrosión no presenta una variación significativa. Al aumentar el tiempo de exposición a 180 días la tasa de corrosión disminuye.

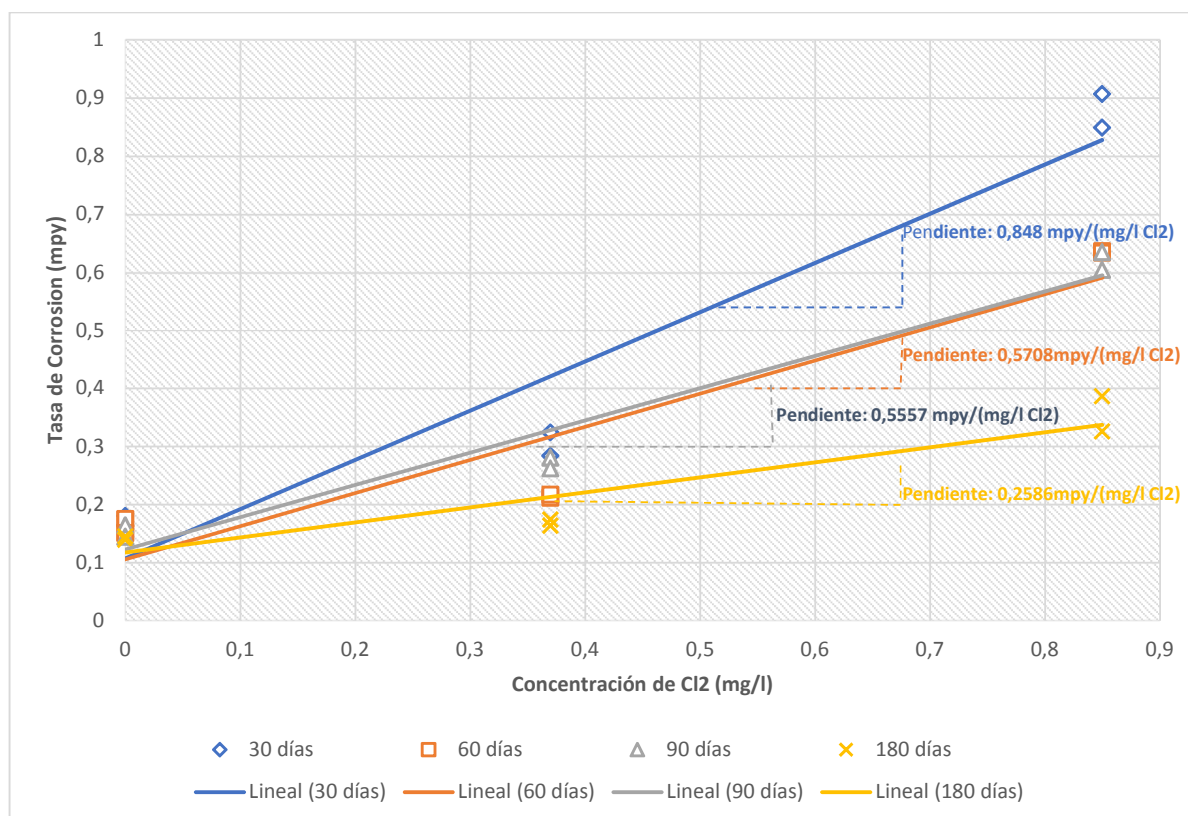


Ilustración 17 Relación de la Tasa de Corrosión con la concentración de cloro. (Fuente: Autor, 2017).

La Ilustración 17 muestra que para cada periodo de exposición la tasa de corrosión presenta una función lineal con respecto a la concentración de cloro. Es decir, la tasa

de corrosión tiende a aumentar mientras se aumenta la concentración de cloro en el agua. El coeficiente de regresión (R^2) obtenido para el periodo de 30 días fue de 0,92. Esto significa que el 92% de los datos de la variación de la tasa de corrosión es explicada por la concentración de cloro en el agua; para el periodo de 60 días fue de 0,88; para el de 90 días fue 0,96 y para el de 180 días fue de 0,86. Mediante el test F ($\alpha=0.05$) se realizó un análisis de varianza, el $F_{\text{calculado}}$ es mucho mayor que el valor F_{tabla} entonces la hipótesis nula es rechazada, esto significa que la variación de la tasa de corrosión es mayor en los cupones expuestos a concentraciones de cloro residual. El valor p obtenido en el análisis de regresión para cada función lineal fue 0,002; 0,005; 0,0007 y 0,007 respectivamente. De los valores de p obtenidos podemos interpretar que la concentración del cloro en el agua incrementa la tasa de corrosión en los cupones de cobre. La Tabla 5 muestra el análisis de varianza ANOVA para cada periodo de exposición.

Tabla 5 Análisis de varianza usado en el test F. (Fuente: Autor, 207)

Efecto	Tiempo de exposición	Pendiente	Desviación estándar	Grados de libertad	F_{tabla}	$F_{\text{calculado}}$	Valor p (Regresión lineal)
mpy vs Cl_2	30 días	0,848	0,104	1,4	7,71	48,1	0,002
	60 días	0,5708	0,089	1,4	7,71	29,77	0,005
	90 días	0,5557	0,051	1,4	7,71	85,47	0,0007
	180 días	0,2586	0,044	1,4	7,71	25,02	0,007

La regresión lineal mejor ajustada para cada caso produjo las siguientes ecuaciones para la tasa de corrosión:

$$TC \text{ (mpy)} = 0.1066 + 0.848 * \left(\frac{mg}{l} Cl_2 \right) \quad \text{Tiempo de exposición: 30 días Ec. 3}$$

$$TC \text{ (mpy)} = 0.1051 + 0.5708 * \left(\frac{mg}{l} Cl_2 \right) \quad \text{Tiempo de exposición: 60 días Ec. 4}$$

$$TC \text{ (mpy)} = 0.1222 + 0.5557 * \left(\frac{mg}{l} Cl_2 \right) \quad \text{Tiempo de exposición: 90 días Ec. 5}$$

$$TC \text{ (mpy)} = 0.1171 + 0.2586 * \left(\frac{mg}{l} Cl_2 \right) \quad \text{Tiempo de exposición: 180 días Ec. 6}$$

Según las pendientes obtenidas en las ecuaciones de regresión, la tasa de corrosión es mucho más sensitiva en el periodo de exposición inicial (30 días) hasta que se forme la capa de pasivación. La Ecuación 3 puede utilizarse para obtener tasas de corrosión para tuberías de cobre generalmente nuevas, es decir tuberías que no presentan la formación de la capa de pasivación en su superficie. La capa de pasivación generalmente reduce el proceso corrosivo, lo cual explica que la tasa de corrosión sea alta antes de la

formación de la capa de pasivación y tiende a disminuir a lo largo del tiempo. Esto se demuestra en la Ilustración 17 debido a que la pendiente disminuye para los periodos de mediana exposición (60 y 90 días). Las Ecuaciones 4 y 5 pueden usarse para tuberías de cobre relativamente nuevas, pero con presencia de la capa de pasivación en su superficie. Mientras que la Ecuación 6 pueden atribuirse a tuberías de cobre con un mayor tiempo de uso, puesto que la pendiente en el periodo de 180 días es mucho menor.

4.3. Variación de la pérdida de peso y tasa de corrosión con el tiempo de exposición.

Los cupones de cobre fueron instalados, retirados y evaluados en distintos periodos de exposición (30, 60, 90, 180 días), así se pudo observar una diferencia entre el peso final y el peso inicial de cada cupón. La Ilustración 18 muestra que la pérdida de peso presenta una relación lineal con el tiempo de exposición. Es decir, a distintas concentraciones de cloro (filtración 0 mg/l Cl_2 ; cuponera 0.37 mg/l Cl_2 y tanques de almacenamiento 0.85 mg/l Cl_2), la diferencia de peso es mayor mientras se aumenta el tiempo de exposición de cada cupón.

El coeficiente de regresión (R^2) obtenido a partir de la diferencia de peso para las concentraciones de cloro de 0; 0,37 y 0,85 mg/l fueron 0,99; 0,81 y 0,87 respectivamente. Esto significa el 99%, 81% y el 87% de los datos de la variación de la pérdida de peso es explicada por el periodo de exposición de los cupones en el agua. Según los valores obtenidos en la pendiente de cada ecuación de regresión, la pérdida de peso es 179 por ciento más sensitiva al tiempo de exposición en una concentración de cloro de 0,85 mg/l en el agua que al agua sin presencia de cloro. En otras palabras, la pérdida de peso es 1,79 veces mayor en agua con 0,85 mg/l de cloro para un periodo de exposición dado que para agua con una concentración de cloro de 0 mg/l. Con el mismo análisis se puede decir que para un periodo de exposición dado el agua con 0,85 mg/l de concentración de cloro la pérdida de peso de los especímenes de cobre fue 1,7 veces mayor que el agua con concentración de 0,37 mg/l de cloro.

Una vez determinada la variación de peso para las distintas concentraciones de cloro se obtuvo la Tasa de Corrosión mediante la Ecuación 1. La Ilustración 19 muestra que la mayor tasa de corrosión se obtuvo en los primeros 30 días para cada concentración de cloro. Esto se debe principalmente a que aún no se forma la capa de pasivación en la superficie de los especímenes. En (Baboian R, 2005; Lane R, 1993) se establece que el tiempo promedio de la formación de la capa de pasivación en las tuberías de cobre es de 200 horas.

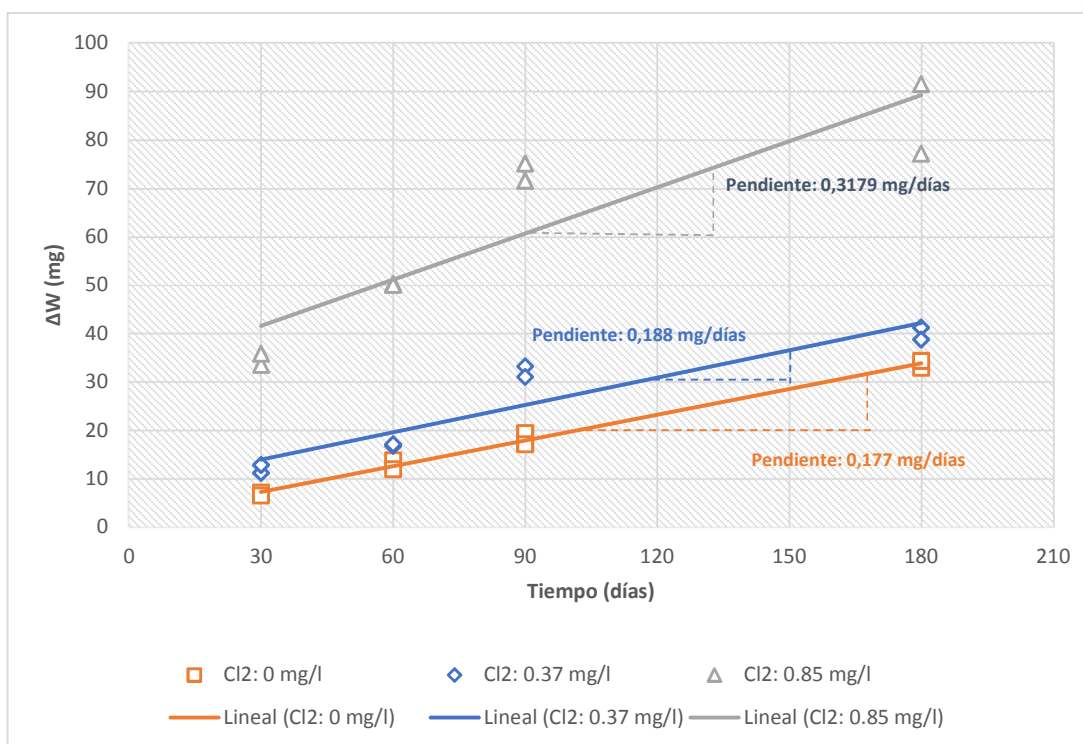


Ilustración 18 Variación del peso con el tiempo de exposición. (Fuente: Autor, 2017)

A medida que el tiempo de exposición aumenta, la variación de la tasa de corrosión disminuye hasta mantenerse casi constante. La variación de la tasa de corrosión en función del tiempo presenta una función potencial mostradas en las guías para la aplicación estadística al análisis de los datos de corrosión (Guide for Applying Statistics to Analysis of Corrosion Data ASTM G16, 2004) para los sistemas de agua potable (Baboian R, 2005).

El coeficiente de regresión (R^2) del ajuste potencial obtenido para cada concentración (0; 0,37; 0,85 mg/l Cl_2) es 0,625; 0,643 y 0,912 respectivamente. Mediante este análisis se determinó que la tasa de corrosión para cada concentración de cloro no presenta un ajuste lineal en función del tiempo, más bien se observa un mejor ajuste potencial con el tiempo de exposición. Debido a que la tasa de corrosión tiende a mantenerse en un valor constante en un mayor tiempo de exposición.

En el Anexo 6 se muestra la tendencia de la variación de la tasa de corrosión en el tiempo. Se observa que las curvas de 0 y 0.37 mg/l de cloro se cruzan en el periodo de un año de exposición y se mantienen constante a un mayor periodo de exposición. Por lo tanto, al aumentar el tiempo de exposición la tasa de corrosión permanecerá constante y no disminuirá a cero.

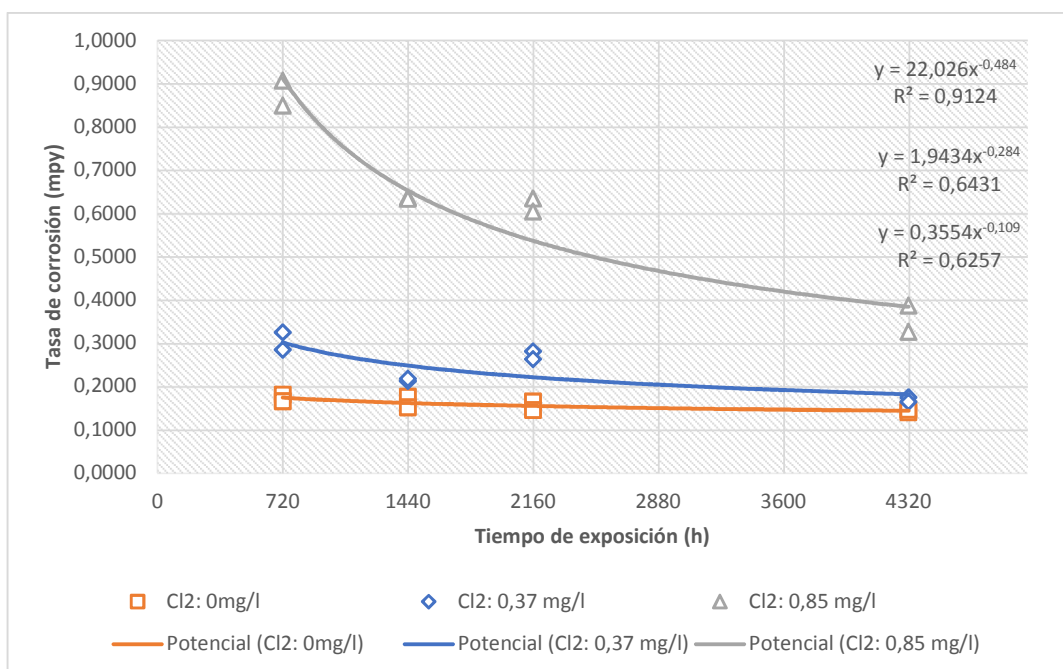


Ilustración 19 Relación de la Tasa de Corrosión con el tiempo de exposición. (Fuentes: Autor, 2017)

Se observa que cuando el periodo de exposición aumenta la tasa de corrosión tiende a mantener un valor constante para cada concentración de cloro en el agua. Si comparamos el promedio de la tasa de corrosión de cada concentración de cloro del periodo de 180 días de exposición tenemos que, el promedio de la tasa de corrosión en 0,75 mg/l de cloro fue 2,5 veces mayor que la tasa de corrosión promedio para el agua sin presencia de cloro. Mientras que, la tasa de corrosión promedio cuya concentración de cloro fue 0,75 mg/l fue 2,11 veces mayor que la tasa de corrosión promedio obtenida en el agua con concentración de cloro de 0,37 mg/l. Esto quiere decir que, en un periodo largo de exposición, una mayor concentración de cloro genera una mayor tasa de corrosión en las tuberías de cobre.

Tabla 6 Diferencia de medias de la Tasa de Corrosión para distintas concentraciones de cloro. (Fuente: Autor, 2017)

Concentración Cl ₂ (mg/l)	Tasa de corrosión promedio (mpy)	Desviación Estándar	Comparación Concentración Cl ₂ (mg/l)	Grados de Libertad	t _{calculado}	t _{tabla}	valor p
0	0,16	0,02	0,85 y 0	7	6,58	2,36	0,0003
0,37	0,24	0,21	0,37 y 0	8	3,92	2,31	0,0044
0,85	0,62	0,06	0,85 y 0,37	8	5,23	2,31	0,0008

Mediante el test t ($\alpha=0.05$) se comparó los promedios entre las concentraciones de cloro de 0.75 y 0 mg/l; 0.37 y 0 mg/l; 0.85 y 0.37 mg/l. Los datos presentados en la Tabla 6

muestran que los valores estadísticos del $t_{\text{calculado}}$ es mucho mayor que el valor t_{tabla} entonces la hipótesis nula es rechazada, esto significa que la variación de la tasa de corrosión es mayor en los cupones expuestos a concentraciones de cloro residual

obtenidos para cada comparación indican una mayor tasa de corrosión de los especímenes de cobre en presencia de una mayor concentración de cloro en el agua. Además, los valores p de cada análisis se encuentra en un rango de 0,0003 a 0,0044, esto valida la relación entre ambos factores.

4.4. Efecto del cloro en la corrosión por liberación de cobre

La corrosión de cobre por liberación de subproductos fue más dependiente de las condiciones de concentración de cloro en el agua que al tiempo de exposición, debido a que todos los cupones fueron sumergidos 30 días en agua con distintas concentraciones. Los resultados de las mediciones de cobre mostrados en la Ilustración 20 detallan las fechas en que fue realizada cada medición y la concentración de cobre disuelto (ug/l) en el agua para cada concentración de cloro (mg/l). Se puede observar que las concentraciones iniciales de cobre presentan una pequeña variación en los diferentes días que fue realizada cada medición y un incremento de cobre en la concentración final para cada concentración de cloro.

Para determinar cuál fue la liberación de cobre en el agua se obtuvo la diferencia entre la concentración final y la inicial para cada medición. Se observa que para cada conjunto de datos existe un valor máximo de cobre disuelto, lo que puede ser debido a que los cupones de cobre eran nuevos y el tiempo experimental de exposición era muy corto para permitir la formación de la capa de pasivación. Después del valor máximo las siguientes mediciones de cobre disuelto disminuyen o mantienen valores promedios.

Al obtener valores promedios de la concentración inicial y final del cobre en el agua podemos observar como varia la liberación de cobre en función de la concentración del cloro. La Ilustración 21 muestra que para las concentraciones de cloro entre 0,25 a 1 mg/l en el agua produce una variación ligera de la concentración de cobre disuelto. Mientras que al aumentar la concentración de cloro a 2 mg/l y 5 mg/l se genera una pendiente más pronunciada de la liberación de cobre.

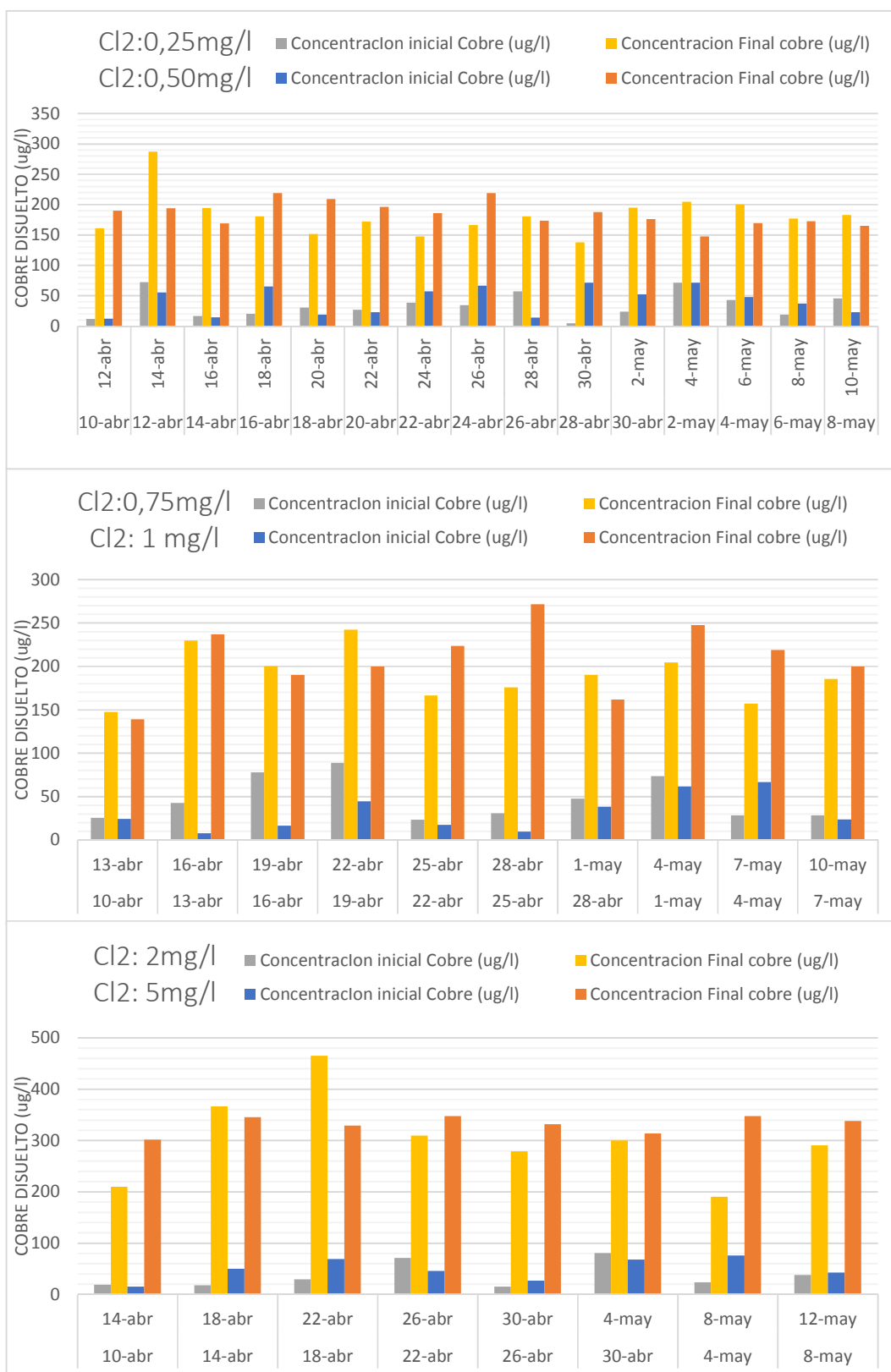


Ilustración 20 Medición de cobre en distintas concentraciones de cloro. (Fuente: Autor, 2017)

Para determinar si existe una influencia del cloro en la liberación de cobre se realizó un análisis de los valores promedios de la liberación de cobre en el agua entre cada concentración de cloro. Mediante el test t ($\alpha=0.05$) se obtuvo que los valores entre los promedios de liberación de cobre comparados entre las concentraciones de 0,25 mg/l y 0,5 mg/l son estadísticamente insignificantes, al igual que entre las concentraciones de 0,5 y 0,75 mg/l; 0,75 y 0,25 mg/l; 1 y 0,25 mg/l; 2 y 5 mg/l. Al comparar las concentraciones 1 y 0,75 mg/l; 2 y 1 mg/l; 1 y 0,5 mg/l. Mientras que al comparar entre las concentraciones de 2 y 0,75 mg/l; 2 y 0,5 mg/l; 5 y 1 mg/l; 5 y 0,75 mg/l los valores estadísticos muestran que existe una gran diferencia en la liberación de cobre. Los $t_{calculado}$ mucho mayores que el valor t_{tabla} determinan que la hipótesis nula es rechazada, esto significa que la variación de disolución de cobre es mayor en los cupones expuestos a concentraciones de cloro residual.

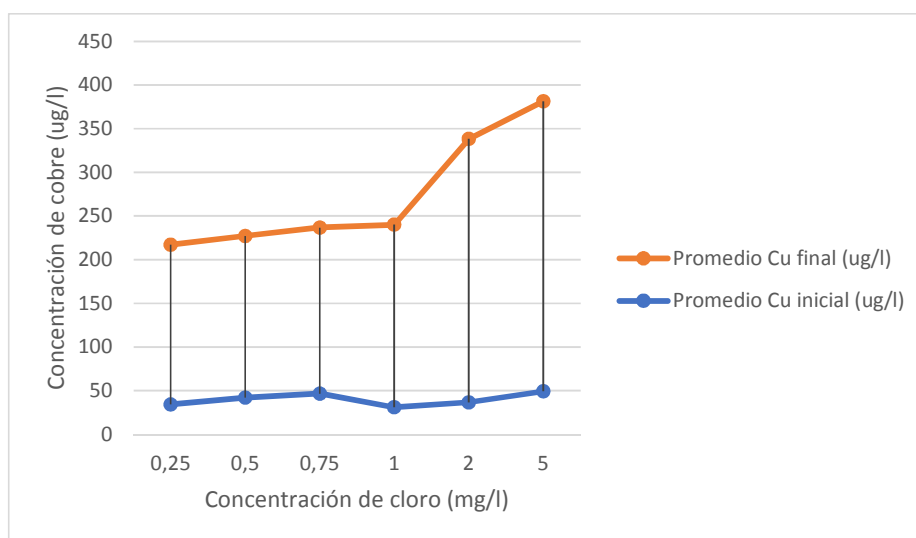


Ilustración 21 Liberación de cobre en el agua. (Fuente: Autor, 2017)

Por tanto, la liberación de cobre en el agua es poco afectada por la presencia de cloro en un rango de concentración entre 0,25 a 0,75 mg/l. Mientras que al sobrepasar el 1 mg/l de cloro en el agua se presenta un incremento significativo en la liberación de cobre. Los valores obtenidos en el test t son mostrados en la Tabla 7. En la Ilustración 21 se observa que en un rango de concentración de cloro entre 0.3 a 0.7 mg/l, comúnmente encontrado en la red de distribución de agua potable, la concentración de cobre liberado se encuentra en el rango de 200 a 250 ug/l. lo cual se encuentra dentro de los límites de cobre disuelto recomendado por la OMS.

Tabla 7 Diferencia de medias mediante el cálculo de valores *t* de student. (Fuente: Autor, 2017)

Concentración Cl ₂ (mg/l)	Liberación promedio Cu (ug/l)	Desviación Estándar	Comparación Concentración Cl ₂ (mg/l)	Grados de Libertad	t _{calculado}	t _{tabla}	valor <i>p</i>
0,25	148,32	27,55	0,5 y 0,25	28	-0,53	2,05	0,6
			0,75 y 0,5	23	0,024	2,07	0,98
0,5	143,01	29,41	1 y 0,75	12	2,21	2,18	0,04
			2 y 1	10	2,53	2,23	0,03
0,75	143,24	20,82	5 y 2	11	1,006	2,2	0,33
			0,75 y 0,25	23	-0,55	2,07	0,58
1	177,93	48,27	1 y 0,5	14	2,16	2,14	0,04
			2 y 0,75	8	3,82	2,31	0,005
2	264,51	95,07	5 y 1	14	5,33	2,14	0,0001
			1 y 0,25	13	1,86	2,16	0,08
5	300,65	54,85	2 y 0,5	8	3,8	2,31	0,005
			5 y 0,75	9	8,28	2,26	1,67E-05

Las concentraciones más altas de cobre disuelto fueron omitidas con la finalidad de establecer una relación entre la concentración de cobre disuelto con la concentración de cloro. El coeficiente de regresión R^2 fue 0.73 para el promedio de las concentraciones. Aunque el R^2 no es alto en este modelo, se ha demostrado que las variables independientes que muestran aumentar el cobre en varios modelos y otros artículos, pueden ser utilizadas para controlar proactivamente la liberación de cobre (Edwards M, 1996; Pehkonen S, 2002; Schock M, 1995).

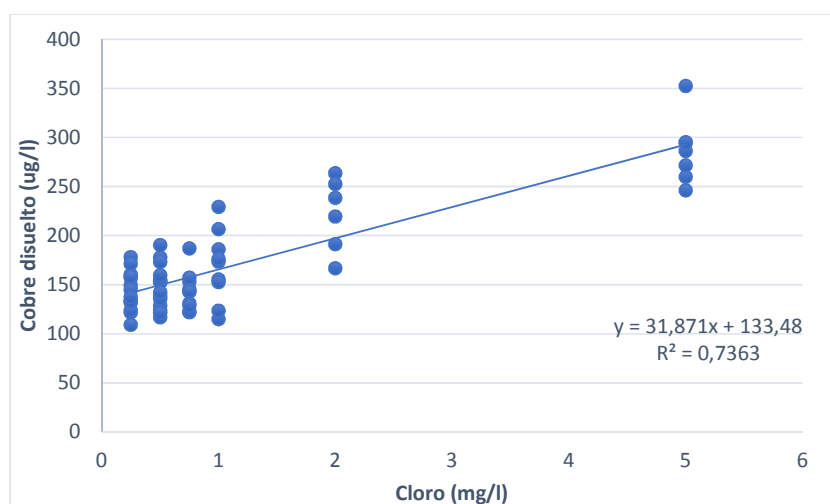


Ilustración 22 Relación del cobre disuelto con la concentración de cloro. (Fuente: Autor, 2017)

El valor *p* obtenido de la relación entre la liberación de cobre y la concentración de cloro fue de 1,9612E-18. Esto indica que existe una fuerte correlación entre los parámetros medidos.

El mejor ajuste de la regresión lineal presento la siguiente ecuación para el cobre disuelto:

$$Cu \left(\frac{ug}{l} \right) = 133.48 + 31.871 * \left(\frac{mg}{l} Cl_2 \right) \text{ Ec. 7}$$

La Ilustración 22 muestra que el promedio de las concentraciones de cobre disuelto presentó una relación lineal con la concentración de cobre. Es decir que, al aumentar la concentración de cloro en el agua la concentración de cobre disuelto tiende a ser mayor.

4.5. Efecto en las tuberías de cobre y en la calidad del agua potable.

Una vez establecidas las tasas de corrosión para las distintas concentraciones de cloro en diferentes tiempos de exposición, se evaluó el posible efecto de los niveles de cloro residual en las tuberías de cobre utilizadas en las conexiones domiciliarias en la red de distribución de la ciudad de Azogues y en la calidad del agua (concentración de cobre disuelto). Mediante los datos obtenidos del modelo experimental del comportamiento del cloro residual en la zona alta de la red de distribución de agua potable de la ciudad de Azogues desarrollados por (Guanuchi C & Ordoñez J, 2017). La Tabla 8 presenta los valores de cloro residual para determinado punto de muestreo realizado en dicha zona; mediante la Ecuación 6 se obtuvo una tasa de corrosión para cada punto de muestreo a partir de la concentración de cloro residual; mientras que la concentración de cobre disuelto fue obtenida usando la Ecuación 7.

Tabla 8 Datos del cloro residual en la Zona Alta de la red de distribución de Azogues. (Fuente: modificado Guanuchi C & Ordoñez J, 2017)

Punto de muestreo	Punto de medición	Cloro residual (mg/l)	Tasa de Corrosión (mpy)	Concentración de cobre disuelto (ug/l)
Vivienda Calle José María Urbina y Vicente Rocafuerte	N5	0,91	0,352	162,48
Vivienda Calle Rafael M. García e Ingapirca	N276	0,9	0,350	162,16
Vivienda Calle los Eucaliptos	N51	0,61	0,275	152,92
Vivienda Calle Los Olivos y Luis Bravo	N66	0,58	0,267	151,97
Vivienda Calle Carlos Aguilar V. y Coronel Francisco Carrasco	N12	0,69	0,296	155,47
Vivienda Calle Bartolomé Serranos y 4 de Noviembre	N118	0,58	0,267	151,97
Vivienda Calle Coronel Francisco Carrasco y Carlos Aguilar Vásquez	N110	0,62	0,277	153,24
Vivienda Calle Jaime Vélez Z.	N202	0,52	0,252	150,05
Vivienda Calle Segundo Méndez y Demetrio Aguilar Malta	N230	0,5	0,246	149,42

Vivienda Calle del Estadio y Galo Plaza L.	N251	0,47	0,239	148,46
Vivienda Av. Gonzales Suarez	N242	0,43	0,228	147,18
Vivienda Calle 4 de Noviembre y 3 de Noviembre	N128	0,49	0,244	149,10
Vivienda Vía Oriente y 3 de Noviembre	N126	0,37	0,213	145,27
Vivienda Av. Gonzales Suarez y Galo Plaza	N240	0,56	0,262	151,33
Vivienda Calle Atahualpa y Piscar Cápac	N170	0,47	0,239	148,46

Al comparar los valores obtenidos en la Tabla 8 de la tasa de corrosión para cada punto de muestreo con la Tabla 1 Rangos de Tasas de corrosión para tuberías de cobre. Fuente: (Baboian R, 2005). Se observó que los puntos N5, N276, N12 presentan tasas de corrosión de 0,35; 0,35; 0,3 respectivamente, estos resultados se encuentran en los rangos de severa corrosión. Los demás puntos se mantienen en el rango de corrosión moderada. La Ilustración 23 a) detalla los resultados obtenidos de la modelación de cloro residual en la Zona Alta.

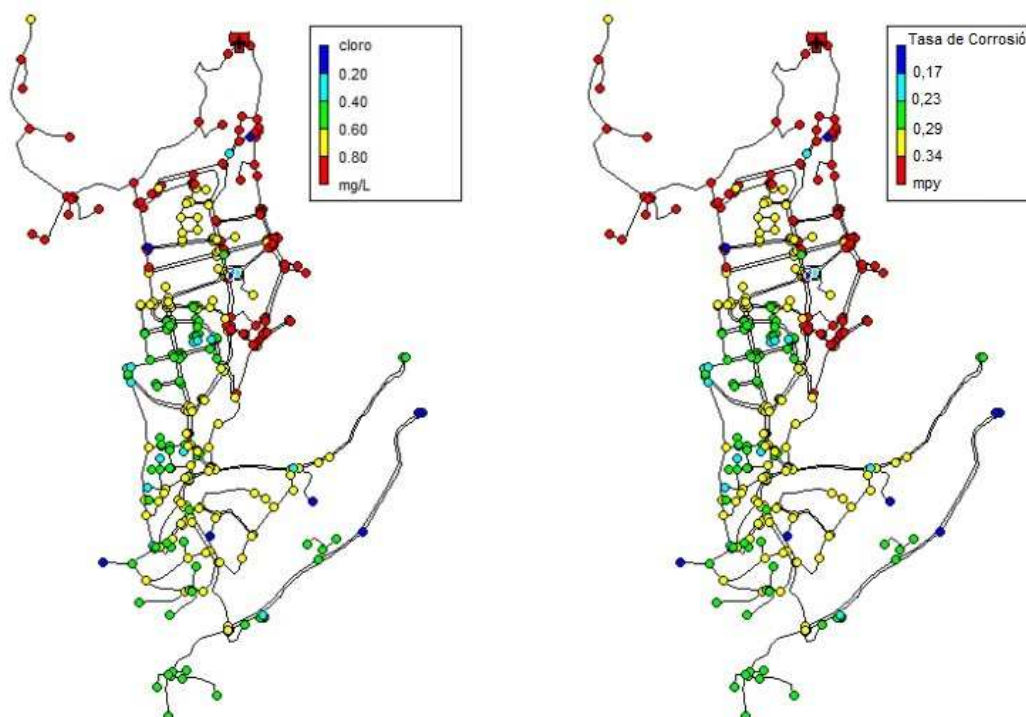


Ilustración 23 a) Concentraciones de cloro (mg/l) simulación EPANET. (Fuente: Guanuchi C & Ordoñez J, 2017) b) Tasa de Corrosión para cada punto de muestreo a partir de la concentración de cloro. (Fuente: modificado (Guanuchi C & Ordoñez J, 2017))

La Ilustración 23 a) Concentraciones de cloro (mg/l) simulación EPANET. (Fuente: Guanuchi C & Ordoñez J, 2017) b) Tasa de Corrosión para cada punto de muestreo a

partir de la concentración de cloro. (Fuente: modificado (Guanuchi C & Ordoñez J, 2017))Ilustración 23 b) muestra que las zonas que presentan una tasa de corrosión severa se encuentran ubicadas en las zonas próximas al tanque de distribución de la Zona Alta. Debido a que presentan concentraciones en un rango de 0.8 a 1 mg/l de cloro. Esto nos ayuda a poder saber que zonas se encuentran propensas a una mayor corrosión y poder evitar daños en las tuberías de las conexiones domiciliarias.

4.6. Vida Remanente de las tuberías de cobre.

Una vez calculada la tasa de corrosión de los cupones de cobre para las diferentes concentraciones de cloro en el agua de distribución se puede establecer la vida remanente de las tuberías de cobre usadas en las conexiones domiciliarias mediante la Ecuación 2. Se estableció que la vida útil de las tuberías se cumple desde la instalación cuando el espesor de la pared de la tubería es el establecido en las especificaciones técnicas del proveedor (1,6 mm) (Nacobre S.A, 2016), hasta que la pérdida del metal de las paredes se encuentre degradada por lo menos un 50% por acción de la corrosión interna. Los resultados se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9 Vida remanente de las tuberías de cobre. (Fuente: Autor, 2017)

Lugar	Concentración de cloro (mg/l)	Tasa de corrosión Promedio (mm/y)	Interpretación (Tabla 1)	Vida remanente (años)
Filtración	0	0,004	Ligera Corrosión	200
Cuponera	0,37	0,006	Ligera Corrosión	132
Tanques de almacenamiento	0,85	0,016	Severa Corrosión	51
Test de Inmersión Estática	5	0,0357	Severa Corrosión	22

Se puede observar que la vida útil de las tuberías disminuye en función de la concentración de cloro presente en el agua potable de distribución. Esto quiere decir que, las tuberías en presencia constante de una alta concentración de cloro en el agua tienden a disminuir su vida útil comparadas con las tuberías que transportan agua con una menor concentración de cloro. Cabe mencionar que estos resultados son únicamente analizados bajo la presencia de cloro residual, ya que las fallas en las tuberías se encuentran influenciadas por diversos factores como son las partículas disueltas y suspendidas en el agua, la velocidad y temperatura del agua; además de la corrosión uniforme. Estas influencias pueden generar corrosión localizada en distintos

puntos de la tubería. Además cabe recalcar que solo se analiza los factores internos, ya que existen procesos de corrosión externa, todos estos factores disminuyen la vida útil de las tuberías como se muestra en (Lewis R, 2016), en donde se establece que comúnmente la vida útil de las tuberías de cobre es de 20 años.

CAPITULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

Mediante el Test de pérdida de peso se logró evaluar la variación de la tasa de corrosión de cupones de cobre obtenidos de las tuberías tipo K utilizadas en las conexiones domiciliarias de los sistemas de distribución de agua potable.

Los cupones instalados en los tanques de almacenamiento de la Planta de Tratamiento de EMAPAL, cuya concentración de cloro residual mantuvo un promedio de 0,85 mg/l, presentaron una mayor pérdida de peso promedio (83,3 mg) para el periodo más largo de exposición de 180, comparados con la pérdida de peso de los cupones (39,95 mg) instalados en la cuponera donde la concentración de cloro fue de 0,37 mg/l de Cl_2 y respecto a los cupones instalados en los canales de interconexión de los filtros en la Planta de EMAPAL (33,6 mg) donde la concentración de cloro fue de 0 mg/l.

La variación en la pérdida de peso de los cupones de cobre aumento en función del tiempo de exposición. Ya que, a un mayor tiempo de exposición, la pérdida de peso es mayor.

La tasa de corrosión de los cupones expuestos a agua sin presencia de cloro (canales de interconexión de los filtros) fue de 0,1419 mpy para el periodo de exposición de 180 días, mientras que la tasa de corrosión de los cupones expuestos a concentraciones de 0,37 y 0,85 mg/l de cloro (cuponera y Tanques de almacenamiento) fue de 0,1687 mpy y 0,356 mpy lo cual indica que el cloro tiene influencia en la velocidad de corrosión de las tuberías de cobre donde se transporta el agua potable.

La variación de la tasa de corrosión incrementa en función al tiempo de exposición hasta cuando se forma la capa de pasivación en la superficie de los cupones, que fue a los 30 días de exposición.

Mediante el Test de Inmersión Estática, también se obtuvo que la concentración de cloro tiene una relación con la liberación de cobre de la superficie del metal, aumenta este último en función a la concentración de cloro presente en el agua.

Debido a que la pérdida de peso de los cupones de cobre instalados en los tanques de almacenamiento y en la cuponera, cuya concentración de cloro fue de 0,85 y 0,37 mg/l, fue 2,5 y 1,2 veces mayor que la pérdida de peso de los cupones instalados en los canales de interconexión de los filtros, en donde el agua presenta una concentración de 0 mg/l de cloro. Se confirmó que la presencia de cloro residual en el agua de distribución

aumenta el desgaste de las paredes de las tuberías de cobre usadas en las conexiones domiciliarias. Este desgaste puede ser observado en la superficie de los cupones como se muestra en el Anexo 7, en el cual se observa un mayor deterioro de la superficie expuesta a concentraciones mayores de cloro residual.

La liberación de cobre en el agua no se ve afectada significativamente por la presencia de cloro en un rango de concentración entre 0,25 a 0,75 mg/l; mientras que al sobrepasar el 1 mg/l de cloro, presenta un incremento significativo en la liberación de cobre, lo cual podría resultar en un futuro riesgo de fallas o rotura en las tuberías, sobre todo en los predios que tienen mayor concentración de cloro, que generalmente son los usuarios que viven cerca de los tanques de distribución.

En un rango de concentración de cloro entre 0.3 a 0.7 mg/l, comúnmente encontrado en la red de distribución de agua potable, la concentración de cobre liberado se presenta en un rango de 200 a 250 ug/l. lo cual se encuentra dentro de los límites de cobre disuelto recomendado por la OMS.

5.2. RECOMENDACIONES

Ya que la corrosión es un proceso electroquímico es necesario el análisis de la variación de la tasa de corrosión mediante curvas de polarización. Este método evalúa el comportamiento del proceso electroquímico que ocurre en la superficie del metal sumergido en un medio corrosivo, del cual se controlan las características físico-químicas del medio, con la finalidad de obtener una tasa de corrosión y poder comparar con los resultados obtenidos en el test de pérdida de peso.

Para comprobar que la variación de la tasa de corrosión disminuye hasta un valor constante, es necesario determinar la pérdida de peso de los cupones de cobre para tiempos de exposición más largos como un año, dos años, etc.

Para determinar si existe corrosión localizada se necesita un análisis de espectrografía o un análisis de rayos x en la superficie del metal, con este análisis es posible observar la existencia de agujeros provocados por el proceso de la corrosión presente y determinar una tasa de corrosión por la profundidad de los agujeros observados. De esta manera es posible complementar el proceso de corrosión uniforme con la posible existencia de corrosión localizada en las tuberías de cobre utilizadas en las conexiones domiciliarias.



BIBLIOGRAFIA

- American Water Works Association. (1996). Internal Corrosion of Water Distribution Systems.
- ASTM G1. (2011). Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens, 03.
- ASTM G4. (1995). Standard Guide for Conducting Corrosion Coupon Tests in Field Applications. 95.
- ASTM G16. (2004). Standard Guide for Applying Statistics to Analysis of Corrosion Data.
- Atlas D. (1982). The corrosion of copper by chlorinated drinking waters., 16(5), 693-698.
- Baboian R. (2005). *Corrosion Tests and Standards: Application and Interpretation* (Segunda). Estados Unidos: ASTM International.
- Bastidas D. (2010). Copper deterioration: Causes, diagnosis and risk minimisation. 98, 430-438.
- Bennett P. (2011). AWT Recommendations and Guidelines for Corrosion Coupons in Cooling Systems.
- Boulay N., Edwards M. (2001). Role of Temperature, Chlorine, and Organic Matter in Copper Corrosion by Product Release in Soft Water., 35, 683-690.
- Calle G. (2007). Enhanced copper release from pipes by alternating stagnation and flow events. 41, 21, 7430-7436.
- Cantor A. (2003). Effect of chlorine on corrosion in drinking water systems., 95(5), 112-123.
- Copeland A, & Lytle D. (2014). Measuring the Oxidation-Reduction Potential of Important Oxidants in Drinking Water. 106, 1, E10-E20.
- Copper Development Association. (2005). Industrial Application - Corrosion Resistance. Recuperado a partir de http://www.copper.org/applications/plumbing/Overview/indl_appns.htm#corrnrres.
- Dietrich A. (2004). Health and aesthetic impacts of copper corrosion on drinking water.
- Edwards M. (1996). Alkalinity, pH, and Cu: Corrosion By-Product Release. 88, 3, 81.
- Edwards M. (2000). Blue water phenomenon.
- Edwards M. (2002). Phosphate inhibition of soluble copper corrosion by-product release. 44, 5, 1057-1071.
- Edwards M. (2004). Role of chlorine and chloramine in corrosion of lead-dearing plumbing materials, 96, 69.
- Edwards M. (2010, julio). *Lead and Copper Corrosion Control in New Construction: Shock Chlorination, Flushing to Remove Debris & In-line Device Product Testing*. Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia.
- EnviroAqua. (2012). Field Corrosion Testing using Coupons.

- EPA. Lead and Copper Rule: A Quick Reference Guide, EPA (2008).
- EPA. 40 CFR Part 141.86. National Primary Drinking Water Regulations. Subpart I: Control of Lead and Copper. (2013).
- EPA. (2016). *Optimal Corrosion Control Treatment Evaluation Technical Recommendations for Primacy Agencies and Public Water Systems*. Estados Unidos: Office of Water.
- Fang L. (2008). CHLORINATION AND CHLORAMINES FORMATION. 3, 12, 528-535.
- Feng Y. (1996). The corrosion behaviour of copper in neutral tap water. Part I: corrosion mechanisms. 38, 387.
- Fontana, & Greene. (1987). *Corrosion Engineering*. New York: McGraw-Hill Book Company.
- Francis R. (1982). The effect of Chlorine Additions to Cooling Water on Corrosion of Copper Alloy Condenser Tubes. 44.
- Gallegos A. (2005). Evaluation of Water Corrosivity Using a Corrosion Rate Model for a Cooling Water System. 8, 133-142.
- Guanuchi C, & Ordoñez J. (2017). «EVALUACION DEL CLORO RESIDUAL EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE DEL CANTON AZOGUES A TRAVES DE UN MODELO EXPERIMENTAL». UNIVERSIDAD DE CUENCA, CUENCA.
- Hach Co. (2013). *HACH DR/890 COLORIMETER PROCEDURES MANUAL*. U.S.A.
- Haseeb, H. H. M. A. S. M. A. (2009). Corrosion behavior of ferrous and non-ferrous metals in palm biodiesel.
- Howe, K. ., Hand, W. ., Crittenden, J. ., Trussell, R. ., & Tchobanoglous, G. . (2013). *Principles of Water Treatment*. (U. of C. at Davis, Ed.), *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53). John Wiley & Sons, Inc.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- INEN 1108, N. Agua Potable. Requisitos. (2010). Ecuador: Instituto ecuatoriano de normalización.
- Institute of Medicine of the National Academies. (2000). Dietary Reference Intakes for Vitamine A, Vitamine K, Arsenic, Boron, Chromium, Copper, Iodine, Iron, Manganese, Molybdenum, Nickel, Silicon, Vanadium, and Zinc.
- Ives D. (1962). Copper corrosion III. Electrochemical theory of general corrosion. 109, 6, 458-462.
- Ives D, & Rawson A. (1962). Copper Corrosion III: Electrochemical Theory of General Corrosion. 109, 6, 458.
- James C. (2004). Relationships between Oxidation-Reduction Potential, Oxidant, and pH in Drinking Water. In Proceedings of the AWWA Water Quality Technology Conference. Denver, CO.: AWWA.
- Kirmeyer G. (1993). Optimizing Chloramines Treatment.
- Knobeloch L. (1998). Gastrointestinal Upsets and New Copper Plumbing: Is There a Connection? 97, 49-53.

- Lane R. (1993). Control of Scale and Corrosion in Building Water Systems.
- Legay, C. ., Rodriguez, M. ., Sérodes, J. ., & Levallois, P. . (2010). Estimation of chlorination by-products presence in drinking water in epidemiological studies on adverse reproductive outcomes: A review. *Science of the Total Environment*, 408(3), 456-472. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.10.047>
- Léon G. (2010). *Evaluación y propuestas de mejora del sistema de agua suevo en la Planta de Tratamiento de aguas blancas de Cervecería Polar*. Universidad Simón Bolívar, Sartenejas.
- Lewis R. (2016). Copper Pipe White Paper. A White Paper Review: History of Use and Performance of Copper Tube For Potable Water Service.
- Louise M. (1985). *THE EFFECT OF PH ADJUSTMENT ON THE INTERNAL CORROSION RATE OF CAST IRON AND COPPER WATER DISTRIBUTION PIPES*. University of British Columbia.
- Lytle D. (2011). Pitting corrosion of copper in waters with high pH and low alkalinity.
- Mendoza J. (2006). *Código de Inspección para Cañerías: Inspección, Reparación, Alteración y Reclasificación de Sistemas de Cañerías en Servicio*.
- Merkel T. (2006). General corrosion of copper in domestic drinking water installations: scientific background and mechanistic understanding. 41, 1, 21-37.
- Nacobre S.A. (2016). Manual Técnico Nacobre.
- Nadja F. (2006, marzo). *INVESTIGATION OF COPPER CONTAMINATION AND CORROSION SCALE MINERALOGY IN AGING DRINKING WATER DISTRIBUTION SYSTEMS*. DEPARTMENT OF THE AIR FORCE AIR UNIVERSITY AIR FORCE INSTITUTE OF TECHNOLOGY, Ohio.
- Nguyen. (2005, Agosto). *Interactions Between Copper and Chlorine Disinfectants: Chlorine Decay, Chloramine Decay and Copper Pitting*. Virginia Polytechnic Institute.
- Nguyen C. (2011). Chloride-to-sulfate mass ratio: Practical studies in galvanic corrosion of lead solder.
- Odessa S. (2013, noviembre). *INTERACTIONS OF CORROSION CONTROL AND BIOFILM ON LEAD AND COPPER IN PREMISE PLUMBING*. Dalhousie University, Halifax, Nova Scotia.
- Palit A. (2000). Copper corrosion in distribution systems: evaluation of a homogenous Cu₂O film and a natural corrosion scale as corrosion inhibitors. 42, 1801-1822.
- Pehkonen S. (2002). Effect of Specific Water Quality Parameters on Copper Corrosion. 58, 2, 156-165.
- Pontius F. (1998). Defining a safe level for copper in drinking water. 90, 17, 18.
- Rhoads W. (2015). Anticipating the effect of green buildings on water quality and infrastructure, 107, 50-61.
- Rodolfo A. (1987). Influence of Buffer Capacity, Chlorine Residual, and Flow Rate on Corrosion of Mild Steel and Copper, 79(2), 62-70.

- Sancha A. (2012). Presencia de Cobre en Aguas de Consumo Humano: Causas, Efectos y Soluciones.
- Sandvig A. (2008). Contribution of Service Line and Plumbing Fixtures to Lead and Copper Rule Compliance Issues. *AwwaRF Order # 91229., Project #3018*.
- Sarver E. (2011). Copper pitting in chlorinated, high-Ph potable water. *103:3*.
- Schijven, J. ., Forêt, J. ., Chardon, J. ., Teunis, P. ., Bouwknecht, M. ., & Tangena, B. . (2016). Evaluation of exposure scenarios on intentional microbiological contamination in a drinking water distribution network. *Water Research*, *96*, 148-154. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.03.057>
- Schock M. (1995). Effect of pH, DIC, Orthophosphate and Sulfate on Drinking Water Cuprosolvency (EPA 600-R-95-085).
- Schock M, & Lytle D. (2011). *Chapter 20: Internal Corrosion and Deposition Control. In Water Quality and Treatment*. (Sexta). Estados Unidos: AWWA and McGraw-Hill, Inc.
- Schock M, & Sandvig A. (2012). Diagnostic Sampling to Reveal Hidden Lead and Copper Health Risks. Presentado en 15th Canadian National Conference and 6th Policy Forum on Drinking Water, Kelowna, BC.
- Schroeder H. (1966). Essential Trace Metals in Man: Copper. *19*, 1007-1034.
- Schweitzer P. (2007). *Fundamentals of Metallic Corrosion: Atmospheric and Media Corrosion of Metals* (Second). Estados Unidos: CRC Press.
- Seiler H. (1994). Handbook on metals in clinical and analytical chemistry.
- Sharifi M. (2015). Prediction of Remaining Life in Pipes using Machine Learning from Thickness Measurements.
- Sharrett A. (1982). Daily Intake of Lead, Cadmium, Copper, and Zinc from Drinking Warer: The Seattle Study of Trace Metal Exposure., *28*, 456-475.
- Shim J. (2004). Copper corrosion in potable water distribution systems: influence of copper products on the corrosion behavior. *58*, 2002-2006.
- Slavickova K. (2013). Monitoring of the Corrosion of Pipes Used for the Drinking Water Treatment and Supply.
- Uhlig H, & Revie R. (1985). *Corrosion Tendency and Electrode Potentials, Corrosion and Corrosion Control, An Introduction to Corrosion Science and Engineering* (Tercera). New York: John Wiley and Sons.
- United States Department of Health and Human Services. (2004). Toxicological profile for copper.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2002). Effects of waterage on distribution system water quality. Washington: U.S. Environmental Protection Agency.
- USEPA. (1991). Maximum contaminant level goals and national primary drinking water regulations for lead and copper; final rule. *FEDERLA REGISTER*, *56*.
- Ward N. (1984). Inorganic chloramines as drinking water disinfectants. *51*, *4*, 74-88.

Weizhong X. (2001). *EFFECT OF SOURCE WATER BLENDING ON COPPER RELEASE IN PIPE DISTRIBUTION SYSTEM: THERMODYNAMIC AND EMPIRICAL MODELS*. University of Central Florida, Florida.

Winston R, & Herbert H. (2008). *CORROSION AND CORROSION CONTROL An Introduction to Corrosion Science and Engineering* (Cuarta). Estados Unidos: WILLY-INTERSCIENCE.

World Health Organization. (2003). Copper: environmental levels and human exposure. Recuperado a partir de http://www.who.int/water_sanitation_health/GDWQ/Chemicals/copperfull.htm#Environmental

Zhang Z. (2007). Effect of pipe corrosion scales on chlorine dioxide consumption in drinking water distribution systems. 42, 129-136.

ANEXOS

Anexo 1

Fotografías de la medición de las dimensiones de los cupones de cobre



Anexo 2**Fotografías de la limpieza, secado y pesado de los cupones de cobre.**

500 ml de Ácido Clorhídrico en 1000 ml de agua.



Agua destilada.



Limpieza de los cupones de cobre



Secado



Pesado



Anexo 3

Fotografías de la instalación de los cupones de cobre.

Canales de interconexión de los filtros.



Tanques de almacenamiento



Cuponera



Anexo 4

Fotografías de la preparación de las soluciones para el Test de Inmersión Estática.

Dilución del cloro para la preparación de las soluciones.



Medición del cloro para cada solución.



Medición de cobre.



Anexo 5

Resultados de las mediciones de cobre para las distintas concentraciones de cloro.

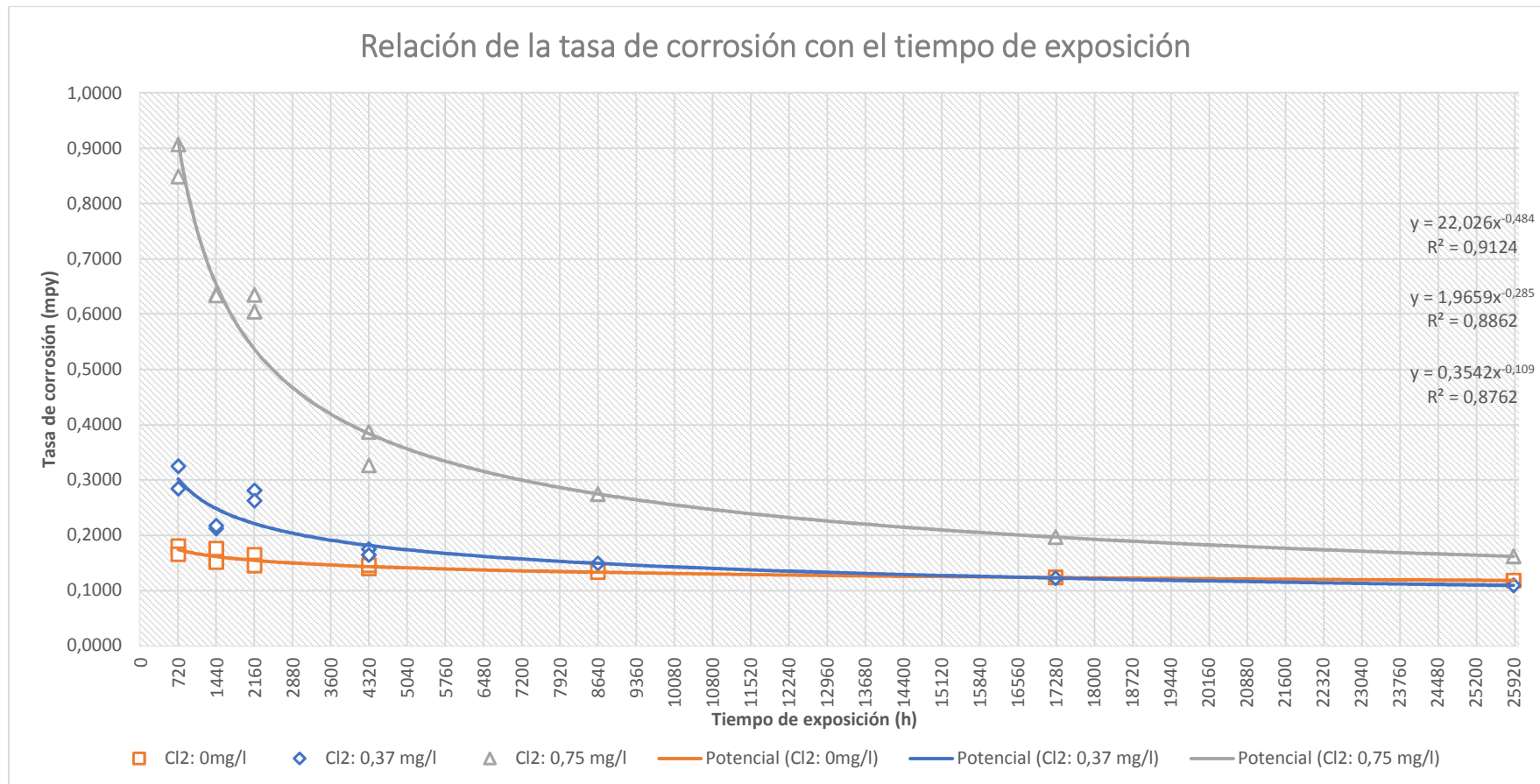
Fecha Inicio	Fecha fin	Concentración Cl2 (mg/l)	Concentración inicial Cobre (ug/l)	Concentración Final cobre (ug/l)	Δ liberación cobre
10-abr	12-abr	0,25	12,1	161,2	149,1
12-abr	14-abr	0,25	72,3	287,2	214,9
14-abr	16-abr	0,25	16,5	194,5	178
16-abr	18-abr	0,25	20,3	180,7	160,4
18-abr	20-abr	0,25	30,6	152,1	121,5
20-abr	22-abr	0,25	26,9	172	145,1
22-abr	24-abr	0,25	38,4	147,6	109,2
24-abr	26-abr	0,25	34,6	166,6	132
26-abr	28-abr	0,25	57,1	180,9	123,8
28-abr	30-abr	0,25	4,76	138,1	133,34
30-abr	2-may	0,25	23,8	195,2	171,4
2-may	4-may	0,25	71,4	204,7	133,3
4-may	6-may	0,25	42,8	200	157,2
6-may	8-may	0,25	18,7	176,9	158,2
8-may	10-may	0,25	45,6	183	137,4
Fecha Inicio	Fecha fin	Concentración Cl2 (mg/l)	Concentración inicial Cobre (ug/l)	Concentración Final cobre (ug/l)	Δ liberación cobre
10-abr	12-abr	0,5	12,5	190,1	177,6
12-abr	14-abr	0,5	55,7	194,3	138,6
14-abr	16-abr	0,5	14,3	169,1	154,8
16-abr	18-abr	0,5	65,3	219,2	153,9
18-abr	20-abr	0,5	19,2	209,5	190,3
20-abr	22-abr	0,5	23	196,3	173,3
22-abr	24-abr	0,5	57,1	185,7	128,6
24-abr	26-abr	0,5	66,6	219	152,4
26-abr	28-abr	0,5	14,2	173,8	159,6
28-abr	30-abr	0,5	71,4	188,1	116,7
30-abr	2-may	0,5	52,3	176,1	123,8
2-may	4-may	0,5	71,4	147,6	76,2
4-may	6-may	0,5	48,2	169,5	121,3
6-may	8-may	0,5	37,1	172,9	135,8
8-may	10-may	0,5	22,9	165,1	142,2
Fecha Inicio	Fecha fin	Concentración Cl2 (mg/l)	Concentración inicial Cobre (ug/l)	Concentración Final cobre (ug/l)	Δ liberación cobre
10-abr	13-abr	0,75	25,5	147,4	121,9
13-abr	16-abr	0,75	42,9	229,8	186,9
16-abr	19-abr	0,75	78	200,2	122,2

19-abr	22-abr	0,75	89	242,3	153,3
22-abr	25-abr	0,75	23,5	166,6	143,1
25-abr	28-abr	0,75	30,7	176,1	145,4
28-abr	1-may	0,75	47,6	190,4	142,8
1-may	4-may	0,75	73,7	204,7	131
4-may	7-may	0,75	28,5	157,1	128,6
7-may	10-may	0,75	28,5	185,7	157,2
Fecha Inicio	Fecha fin	Concentración Cl2 (mg/l)	Concentración inicial Cobre (ug/l)	Concentración Final cobre (ug/l)	Δ liberación cobre
10-abr	13-abr	1	24,3	139,1	114,8
13-abr	16-abr	1	7,6	236,8	229,2
16-abr	19-abr	1	16,6	190,2	173,6
19-abr	22-abr	1	44,7	200	155,3
22-abr	25-abr	1	17,3	223,8	206,5
25-abr	28-abr	1	9,8	271,4	261,6
28-abr	1-may	1	38,4	161,9	123,5
1-may	4-may	1	61,5	247,6	186,1
4-may	7-may	1	66,6	219,1	152,5
7-may	10-may	1	23,8	200	176,2
Fecha Inicio	Fecha fin	Concentración Cl2 (mg/l)	Concentración inicial Cobre (ug/l)	Concentración Final cobre (ug/l)	Δ liberación cobre
10-abr	14-abr	2	18,8	210	191,2
14-abr	18-abr	2	18	366,4	348,4
18-abr	22-abr	2	29,3	465,2	435,9
22-abr	26-abr	2	70,9	309,5	238,6
26-abr	30-abr	2	15,3	278,9	263,6
30-abr	4-may	2	80,7	300	219,3
4-may	8-may	2	23,8	190,4	166,6
8-may	12-may	2	38	290,47	252,47
Fecha Inicio	Fecha fin	Concentración Cl2 (mg/l)	Concentración inicial Cobre (ug/l)	Concentración Final cobre (ug/l)	Δ liberación cobre
10-abr	14-abr	5	15,3	301,5	286,2
14-abr	18-abr	5	50,2	345,2	295
18-abr	22-abr	5	69,2	329,1	259,9
22-abr	26-abr	5	45,8	347,8	352,6
26-abr	30-abr	5	26,8	331,8	398,6
30-abr	4-may	5	68,1	314,2	246,1
4-may	8-may	5	76,1	347,6	271,5
8-may	12-may	5	42,8	338,1	295,3



Anexo 6

Tendencia de la variación de la tasa de corrosión con el tiempo.



Anexo 7a

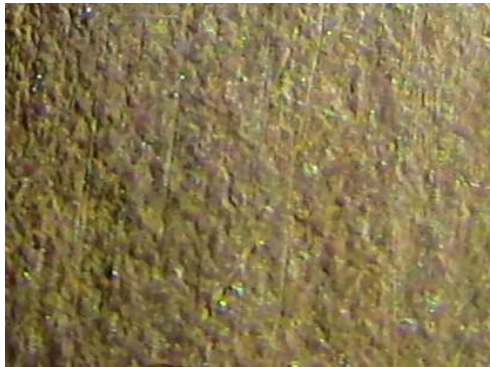
Examinación visual de la superficie de los cupones de cobre para cada tiempo de exposición.

Canales de interconexión.

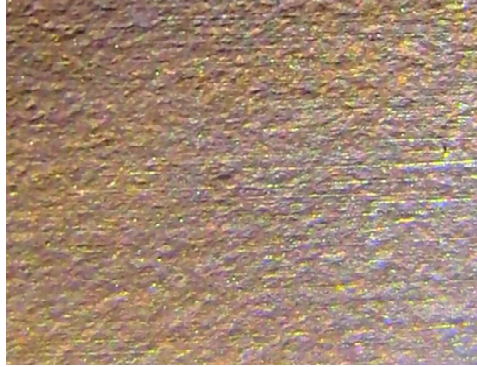
30 días



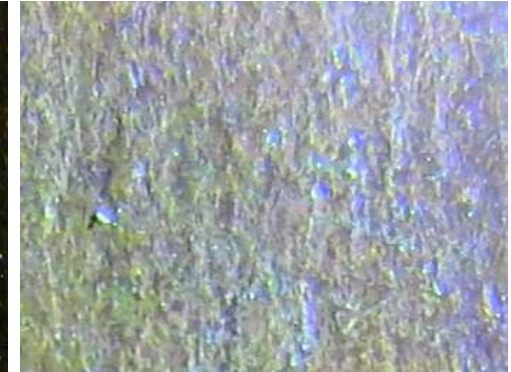
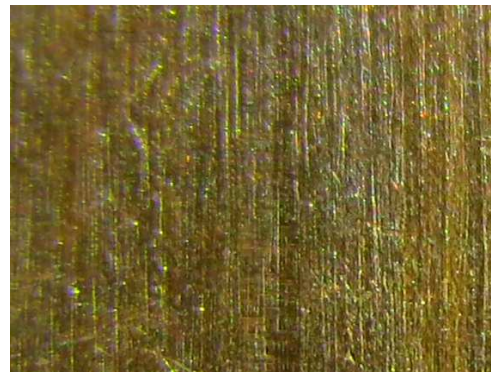
60 días



90 días



180 días



Anexo 7b

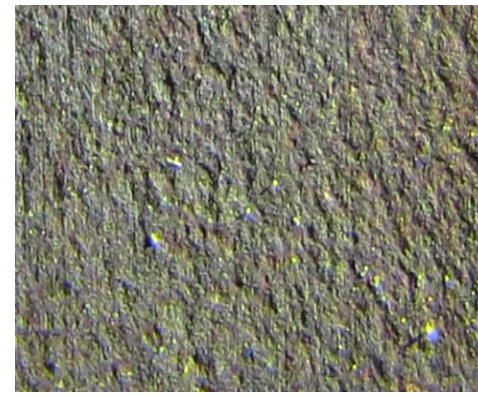
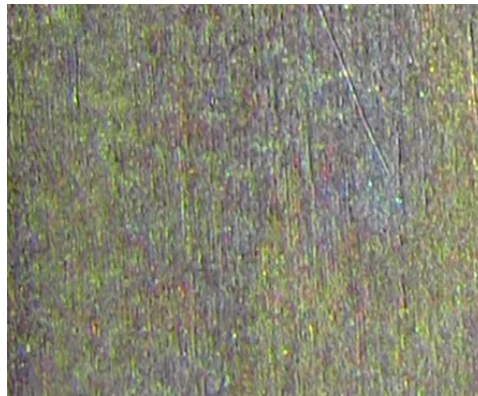
Cuponera

30 días

60 días

90 días

180 días





Anexo 7c

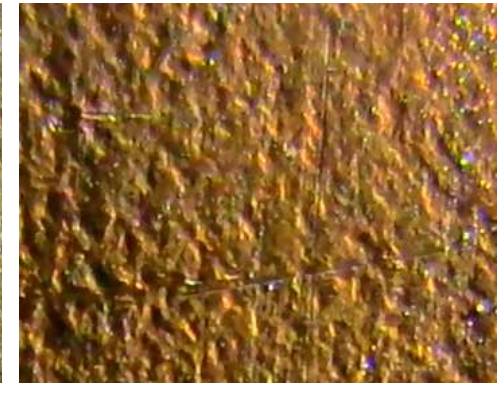
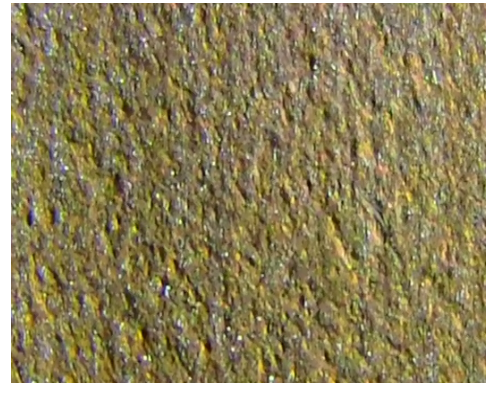
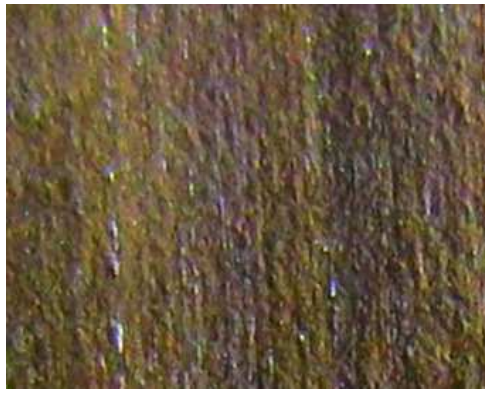
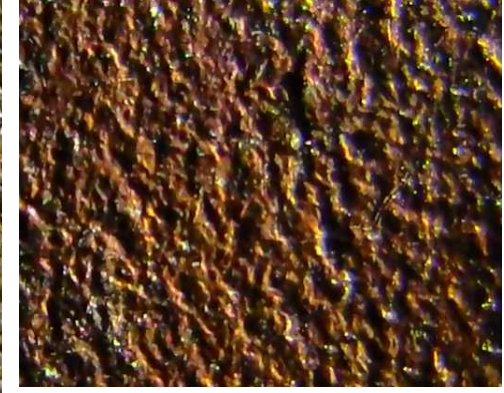
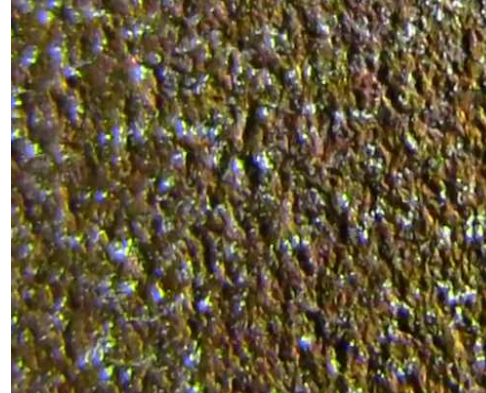
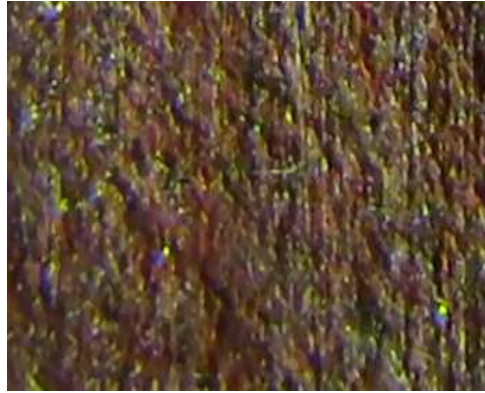
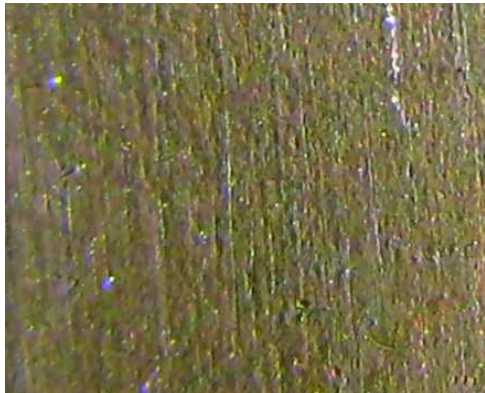
Tanques de Almacenamiento

30 días

60 días

90 días

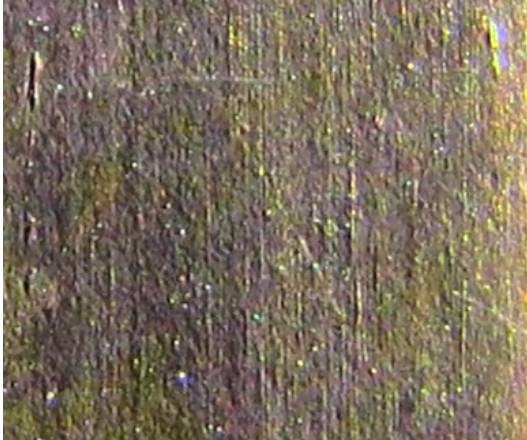
180 días



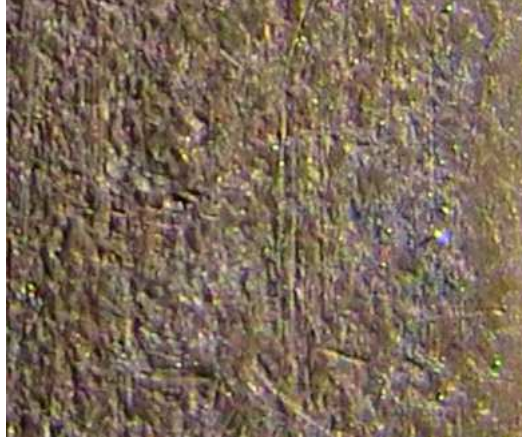
Anexo 8

Examinación visual de la superficie de los cupones de cobre del Test de Inmersión Estática para cada concentración de cloro.

0,25 mg/l Cl_2



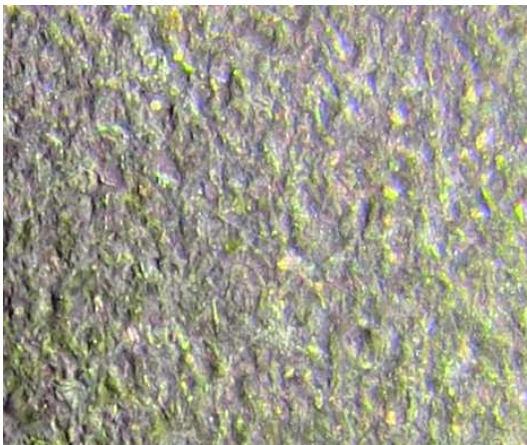
0,5 mg/l Cl_2



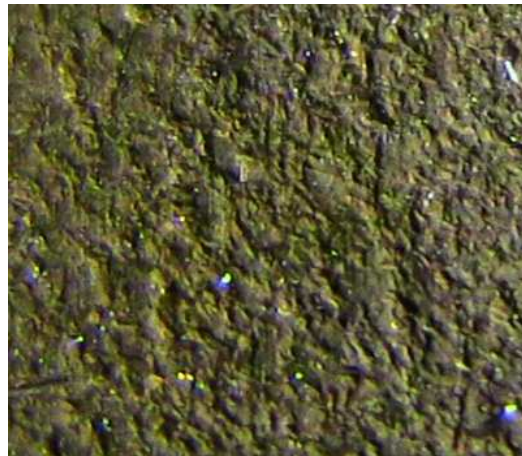
0,75 mg/l Cl_2



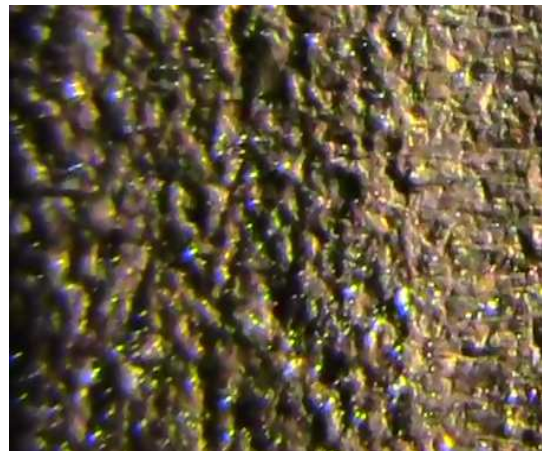
1 mg/l Cl_2



2 mg/l Cl_2




5 mg/l Cl_2





Anexo 9

Certificado de calibración del equipo colorimétrico digital marca HACH 890 utilizado para la medición de cloro residual

		CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN Ciudadela Guayaquil, calle 1era mz 21 solar 10 Guayaquil - Ecuador Pbx: 04-2282007 Fax: ext. 403 http://www.elicrom.com mail: ventas@elicrom.com																																																																									
CERTIFICADO No:		1900-01-16																																																																									
IDENTIFICACIÓN DEL CLIENTE																																																																											
EMPRESA: FAUSTO FERNANDO GARCIA AVILA																																																																											
DIRECCIÓN: AZOGUES																																																																											
TELÉFONO: 2245793																																																																											
IDENTIFICACIÓN DEL EQUIPO																																																																											
EQUIPO:		COLORIMETRO																																																																									
MARCA:		HACH																																																																									
MODELO/TIPO:		DR / 890																																																																									
SERIE:		110890C85404																																																																									
CÓDIGO ASIGNADO EN ELICROM:		EC-2016-1832																																																																									
UNIDAD DE MEDIDA:		(1) Absorbancia																																																																									
RESOLUCIÓN:		0,001																																																																									
RANGO:		(0 a 2) (1) Absorbancia																																																																									
UBICACIÓN:		NO ESPECIFICA																																																																									
EQUIPOS UTILIZADOS																																																																											
CODIGO	NOMBRE	MARCA	MODELO	SERIE	FECHA CAL. PROX. CAL.																																																																						
EL MR 123	ABSORBANCE STANDARD KIT DRICHECK	HACH	27639-00	A8019	EXP : ENERO 2018																																																																						
EL PT 365	TERMOMIGROMETRO	CENTER	342	140103655	02-abr-16 02-abr-17																																																																						
CALIBRACIÓN																																																																											
PROCEDIMIENTO:		GENERAL																																																																									
LUGAR DE CALIBRACIÓN:		LABORATORIO ELECTROQUIMICA - ELICROM																																																																									
TEMPERATURA MEDIA:		22,8 °C																																																																									
HUMEDAD MEDIA:		47,4 %HR																																																																									
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Unidad de Medida</th> <th>Patrón</th> <th>Equipo</th> <th>Corrección</th> <th>Incertidumbre</th> <th>Observaciones</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>(1) (Absorbancia)</td> <td>0,600</td> <td>0,601</td> <td>-0,001</td> <td>0,029</td> <td rowspan="3">420 nm</td> </tr> <tr> <td>(1) (Absorbancia)</td> <td>1,204</td> <td>1,220</td> <td>-0,016</td> <td>0,058</td> </tr> <tr> <td>(1) (Absorbancia)</td> <td>1,761</td> <td>1,771</td> <td>-0,010</td> <td>0,087</td> </tr> <tr> <td>(1) (Absorbancia)</td> <td>0,617</td> <td>0,613</td> <td>0,004</td> <td>0,029</td> <td rowspan="3">520 nm</td> </tr> <tr> <td>(1) (Absorbancia)</td> <td>1,231</td> <td>1,244</td> <td>-0,013</td> <td>0,058</td> </tr> <tr> <td>(1) (Absorbancia)</td> <td>1,794</td> <td>1,803</td> <td>-0,009</td> <td>0,087</td> </tr> <tr> <td>(1) (Absorbancia)</td> <td>0,617</td> <td>0,645</td> <td>-0,028</td> <td>0,029</td> <td rowspan="3">560 nm</td> </tr> <tr> <td>(1) (Absorbancia)</td> <td>1,228</td> <td>1,267</td> <td>-0,039</td> <td>0,058</td> </tr> <tr> <td>(1) (Absorbancia)</td> <td>1,793</td> <td>1,865</td> <td>-0,072</td> <td>0,087</td> </tr> <tr> <td>(1) (Absorbancia)</td> <td>0,619</td> <td>0,628</td> <td>-0,009</td> <td>0,029</td> <td rowspan="3">610 nm</td> </tr> <tr> <td>(1) (Absorbancia)</td> <td>1,230</td> <td>1,247</td> <td>-0,017</td> <td>0,058</td> </tr> <tr> <td>(1) (Absorbancia)</td> <td>1,789</td> <td>1,819</td> <td>-0,030</td> <td>0,087</td> </tr> </tbody> </table>						Unidad de Medida	Patrón	Equipo	Corrección	Incertidumbre	Observaciones	(1) (Absorbancia)	0,600	0,601	-0,001	0,029	420 nm	(1) (Absorbancia)	1,204	1,220	-0,016	0,058	(1) (Absorbancia)	1,761	1,771	-0,010	0,087	(1) (Absorbancia)	0,617	0,613	0,004	0,029	520 nm	(1) (Absorbancia)	1,231	1,244	-0,013	0,058	(1) (Absorbancia)	1,794	1,803	-0,009	0,087	(1) (Absorbancia)	0,617	0,645	-0,028	0,029	560 nm	(1) (Absorbancia)	1,228	1,267	-0,039	0,058	(1) (Absorbancia)	1,793	1,865	-0,072	0,087	(1) (Absorbancia)	0,619	0,628	-0,009	0,029	610 nm	(1) (Absorbancia)	1,230	1,247	-0,017	0,058	(1) (Absorbancia)	1,789	1,819	-0,030	0,087
Unidad de Medida	Patrón	Equipo	Corrección	Incertidumbre	Observaciones																																																																						
(1) (Absorbancia)	0,600	0,601	-0,001	0,029	420 nm																																																																						
(1) (Absorbancia)	1,204	1,220	-0,016	0,058																																																																							
(1) (Absorbancia)	1,761	1,771	-0,010	0,087																																																																							
(1) (Absorbancia)	0,617	0,613	0,004	0,029	520 nm																																																																						
(1) (Absorbancia)	1,231	1,244	-0,013	0,058																																																																							
(1) (Absorbancia)	1,794	1,803	-0,009	0,087																																																																							
(1) (Absorbancia)	0,617	0,645	-0,028	0,029	560 nm																																																																						
(1) (Absorbancia)	1,228	1,267	-0,039	0,058																																																																							
(1) (Absorbancia)	1,793	1,865	-0,072	0,087																																																																							
(1) (Absorbancia)	0,619	0,628	-0,009	0,029	610 nm																																																																						
(1) (Absorbancia)	1,230	1,247	-0,017	0,058																																																																							
(1) (Absorbancia)	1,789	1,819	-0,030	0,087																																																																							
OBSERVACIONES																																																																											
La incertidumbre típica de medición se ha determinado conforme al documento EA-4/02. Este certificado no podrá reproducirse excepto en su totalidad sin la aprobación escrita del laboratorio Elicrom Calibración. El presente certificado se refiere solamente al equipo arriba descrito al momento del ensayo.																																																																											
CALIBRACIÓN REALIZADA POR: Alcides Bazaña																																																																											
FECHA CALIBRACIÓN:		2016-07-28		FECHA PRÓXIMA: 2017-07																																																																							
AUTORIZADO POR:		Ing. Sabino Pineda		RECIBIDO POR:																																																																							
GERENTE TECNICO				RESPONSABLE - CLIENTE																																																																							


Certificado de acreditación para calibración de equipos de la Empresa portadora del servicio


 **Organismo de Acreditación Ecuatoriano** 

CERTIFICADO DE ACREDITACIÓN

ELICROM Cía. Ltda.

Guayaquil - Ecuador





LABORATORIO DE CALIBRACIÓN
N° OAE LC C 10-009

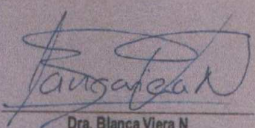
Se encuentra acreditado por el OAE en cumplimiento con los requerimientos establecidos en la Norma NTE INEN-ISO/IEC 17025:2006 "Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y de calibración", equivalente a la norma ISO/IEC 17025:2005 (E), y con los criterios y procedimientos de acreditación del OAE.


Esta acreditación demuestra la competencia técnica para la **CALIBRACIÓN de INSTRUMENTOS** en las magnitudes, campos de medida, y con las incertidumbres y procedimientos detallados en el **ALCANCE DE ACREDITACIÓN**, que se realiza en las localizaciones identificadas en el mismo.

El **ALCANCE DE ACREDITACIÓN** es un documento fundamental de la acreditación y puede ser revisado y actualizado cuando sea pertinente, por el OAE. La edición vigente está disponible en la página web del OAE, www.oae.gob.ec, con el mismo nombre y número de acreditación que consta en este certificado.

La acreditación está condicionada al cumplimiento continuo por parte del laboratorio con los requisitos de acreditación del OAE.

La ausencia del nombre del laboratorio y de su alcance de acreditación en la página web del OAE, o la publicación del estado de retiro, indica que la acreditación ya no está vigente.


Dra. Blanca Viera N
DIRECTORA GENERAL DEL OAE



ACREDITACIÓN INICIAL: 2010-05-19
Ley 2007-076 del Sistema Ecuatoriano de la Calidad RC-845-2007-76, Art. 21.